

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées



AUTONOMIE EN SITE ISOLE

ETUDE D'UN PROJET DE REHABILITATION D'UNE HABITATION SANS EAU NI ELECTRICITE

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil Architecte par MONACO Emilie

Année académique 2011/2012 - Promotrice: REITER Sigrid

AUTONOMIE EN SITE ISOLE

ETUDE D'UN PROJET DE REHABILITATION D'UNE HABITATION SANS EAU NI ELECTRICITE

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil Architecte par MONACO Emilie

Année académique : 2011 – 2012

Promotrice : REITER Sigrid

Membres du jury : BLEUS Jean-Marie
HAUGLUSTAINE Jean-Marie
CORNESSE Jean-Claude

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier...

Madame Sigrid Reiter, ma promotrice, pour sa disponibilité, l'intérêt porté à la réalisation de ce travail et la confiance qu'elle m'a accordée,

Les membres de mon jury, Messieurs Jean-Marie Bleus, Jean-Claude Cornesse et Jean-Marie Hauglustaine, pour leur disponibilité,

La famille Lavianne, grâce à laquelle j'ai pu traiter d'un sujet aussi enrichissant,

Ma famille et mes proches, pour leurs encouragements, leur aide et leur soutien inconditionnel.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
1.1	INTRODUCTION GENERALE	1
1.2	CADRE D'ETUDE	1
1.3	METHODOLOGIE.....	3
2	LE PROJET - PRESENTATION ET OBJECTIFS.....	6
2.1	PRESENTATION DU PROJET.....	6
2.1.1	LOCALISATION.....	6
2.1.2	DECOUVERTE DE L'HABITATION.....	7
2.1.3	BREVE ANALYSE DE SITE	9
2.1.4	CONCLUSIONS	13
2.2	OBJECTIFS	13
2.2.1	OBJECTIFS EN MATIERE D'ARCHITECTURE	13
2.2.2	OBJECTIFS EN MATIERE D'ENVIRONNEMENT	13
2.2.3	OBJECTIFS EN MATIERE DE PERFORMANCE THERMIQUE	14
2.2.4	CONCLUSIONS	15
3	INTERVENTIONS ARCHITECTURALES	17
3.1	INTRODUCTION.....	17
3.2	CONCEPTION ARCHITECTURALE ET BIOCLIMATIQUE	17
3.2.1	LE PROGRAMME	17
3.2.2	LA CONCEPTION ARCHITECTURALE.....	18
3.2.3	LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE	18
3.2.4	L'ECLAIRAGE NATUREL	22
3.2.5	CONCLUSIONS	23
3.3	LE TRAITEMENT DE L'ENVELOPPE.....	23
3.3.1	L'ISOLATION THERMIQUE	24
3.3.2	LES TRAVAUX D'ISOLATION	26
3.3.3	LES PONTS THERMIQUES	31
3.4	L'IMPLEMENTATION DANS PLEIADES+COMFIE.....	34
3.4.1	LA BIBLIOTHEQUE	34
3.4.2	LE BATIMENT.....	35
3.4.3	STD COMFIE.....	35
3.4.4	SIMULATION	35
3.5	SYNTHESE.....	38
4	PROBLEMATIQUE DE L'EAU	40
4.1	INTRODUCTION.....	40
4.1.1	OBJECTIFS.....	40
4.1.2	CONTEXTE ET ENJEUX.....	40
4.2	RECOLTE ET TRAITEMENT DES EAUX DE PLUIE.....	41
4.2.1	QUALITE DE L'EAU DE PLUIE	41
4.2.2	RECOLTE DE L'EAU DE PLUIE : PROCESSUS ET MATERIAUX	43
4.3	L'EAU DOMESTIQUE	50
4.3.1	QUALITE DE L'EAU DOMESTIQUE.....	50
4.3.2	CONSOMMATION EN EAU DOMESTIQUE	51
4.3.3	SYSTEMES DE POTABILISATION DE L'EAU PLUVIALE	56
4.3.4	LE GROUPE HYDROPHORE	62
4.4	TRAITEMENT DES EAUX USEES	63
4.4.1	POLLUANTS DES EAUX USEES	63

4.4.2	SYSTEMES D'EPURATION DES EAUX USEES.....	67
4.5	ELABORATION D'UNE STRATEGIE ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS.....	73
4.5.1	DIMENSIONNEMENT DE LA CITERNE A EAU DE PLUIE.....	73
4.5.2	DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USEES.....	78
4.6	SOLUTIONS ALTERNATIVES.....	78
4.6.1	COLLECTE PAR UN PUIITS.....	79
4.6.2	REUTILISATION DES EAUX USEES.....	80
4.6.3	AUGMENTATION DE LA SURFACE DE COLLECTE.....	82
4.7	SYNTHESE.....	83
5	PROBLEMATIQUE DE L'ELECTRICITE.....	87
5.1	INTRODUCTION.....	87
5.1.1	OBJECTIFS.....	87
5.1.2	MISE EN CONTEXTE.....	87
5.2	LA PRODUCTION D'ELECTRICITE IN SITU.....	88
5.2.1	LE PHOTOVOLTAÏQUE.....	88
5.2.2	L'EOLIEN.....	90
5.2.3	AUTRES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE.....	93
5.2.4	LE STOCKAGE DE L'ELECTRICITE.....	95
5.2.5	CONCLUSIONS.....	98
5.3	ECLAIRAGE ET ELECTROMENAGERS.....	99
5.3.1	ECLAIRAGE.....	99
5.3.2	ELECTROMENAGERS.....	101
5.3.3	SENSIBILISATION DES OCCUPANTS.....	106
5.3.4	CONSOMMATION ELECTRIQUE.....	106
5.4	VENTILATION ET REFROIDISSEMENT.....	108
5.4.1	VENTILATION.....	108
5.4.2	REFROIDISSEMENT.....	111
5.5	CHAUFFAGE ET EAU CHAUDE SANITAIRE.....	111
5.5.1	INTRODUCTION.....	111
5.5.2	LES SYSTEMES EXPLOITANT LES ENERGIES RENOUVELABLES.....	112
5.5.3	LES SYSTEMES DE DISTRIBUTION.....	118
5.5.4	SOLUTION RETENUE ET DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION.....	121
5.6	STRATEGIE ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE.....	126
5.6.1	CONSOMMATION TOTALE EN ELECTRICITE.....	126
5.6.2	ANALYSE DES DONNEES ET CHOIX DU MODE DE PRODUCTION.....	127
5.6.3	DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS.....	131
5.7	SYNTHESE.....	138
6	SYNTHESE.....	141
6.1	LE PROJET FINAL.....	141
6.1.1	ETUDE DE SITE PROJETEE.....	141
6.1.2	PROPOSITION D'IMPLANTATION.....	142
6.2	DISCUSSIONS.....	145
6.2.1	LA FAISABILITE TECHNIQUE.....	145
6.2.2	LA RENTABILITE ECONOMIQUE.....	145
6.2.3	L'INTERET ECOLOGIQUE.....	146
6.2.4	LES PARAMETRES CLIMATIQUES.....	146
6.2.5	LES DIFFICULTES LEGISLATIVES.....	147
6.2.6	SYNTHESE.....	147
7	CONCLUSION.....	149
7.1	CONCLUSIONS GENERALES.....	149

7.2 PERSPECTIVES	150
BIBLIOGRAPHIE.....	151
TABLE DES FIGURES.....	155
TABLE DES TABLEAUX	157
TABLE DES GRAPHIQUES.....	159

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1 INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION GENERALE

Une maison sur une colline drômoise, voilà le point de départ de ce travail de fin d'études. Une maison qui a le mérite d'exister depuis plus de 150 ans, mais qui n'est plus habitée depuis longtemps. En cause, le mode de vie qu'elle imposerait à ses habitants. Car cette maison, suite à son isolement, n'est ni raccordée au réseau public d'électricité, ni à celui d'alimentation en eau, ni même au réseau public d'assainissement des eaux usées.

Si, de prime abord, les habitations en site isolé semblent ne constituer que quelques rares exceptions, il n'en est cependant rien. Il est vrai que le contexte de la Belgique, petit pays à forte densité de population, tend à supporter cette idée. Par contre, dans des pays tels que la France, la Grande-Bretagne et, à plus grande échelle, les Etats-Unis, la Chine ou encore l'Australie, la réalité est toute autre. De par leur superficie, leur relief ou leur climat, il existe bon nombre de sites où l'acheminement des réseaux publics est inenvisageable. Ces constructions sont là et attendent. Elles attendent et se détériorent progressivement. En autorisant cela, c'est toute une partie du patrimoine rural mondial que l'on autorise à disparaître. Une partie de l'Histoire, un témoin du passé.

A l'ère de la technologie, nous pouvons nous questionner. N'existe-t-il pas des moyens de valoriser ce patrimoine, de le mettre aux normes de confort afin de l'occuper ? Les progrès scientifiques d'aujourd'hui ne peuvent-ils pas profiter aux réalisations d'hier ? Quel est leur potentiel et quelles en sont les limites ? C'est à toutes ces questions que nous allons tenter d'apporter une réponse.

Le présent travail traite donc de la valorisation du patrimoine bâti en site isolé au moyen de nouvelles technologies. Des énergies renouvelables aux systèmes de potabilisation de l'eau, nous verrons quelles alternatives s'offrent réellement à la réalisation de ce type de projets. A travers un cas concret de réhabilitation, ce travail se propose donc d'évaluer la faisabilité d'une autonomie totale en eau et en électricité.

1.2 CADRE D'ETUDE

Autonomie... le concept est lancé ! Vaste, cette appellation est cependant peu présente dans la littérature et souvent source d'amalgames. Il nous faut donc définir avec précision la signification de ce terme et les intentions qu'il englobe dans le cadre de ce travail.

Selon le dictionnaire, la définition de l'autonomie est « le caractère de quelque chose qui fonctionne ou évolue indépendamment d'autre chose » (larousse.fr, 2012). L'autonomie d'une habitation est donc sa tendance à subvenir seule à ses propres besoins. Elle peut toucher à des domaines variés, tels que l'eau, le chauffage ou l'électricité. Il ne s'agit donc ni d'une maison passive, pour laquelle la réduction des besoins en chauffage prime sur toute autre considération, ni d'une maison zéro-énergie, pour laquelle seul le bilan annuel de consommation électrique est pris en compte.

A l'heure actuelle, il existe deux grands types d'habitations autonomes. Le premier touche à un domaine expérimental tandis que le second résulte d'un désir de vivre en marge de la société. Etudions deux exemples types.

EXEMPLE 1 : MAISON SOLAIRE AUTO-SUFFISANTE (FREIBURG – ALLEMAGNE)

Construite en 1992, cette maison est un projet expérimental de l'Institut Fraunhofer à Freiburg, en Allemagne. L'objectif poursuivi est que la maison puisse subvenir à l'ensemble de ses besoins en chauffage et en électricité au moyen de l'énergie solaire, passive et active. Pour ce faire, de nombreuses technologies de pointe ont été mises en œuvre. Les besoins en chauffage ont été réduits au moyen d'une isolation transparente des murs, et ceux en électricité par le biais d'appareils particulièrement économes. Certains de ces appareils ont été spécifiquement mis en œuvre pour l'habitation, comme cet échangeur de chaleur dont le COP¹ avoisine les 40 ! Des dispositifs complexes de stockage à long terme de l'électricité et de la chaleur exploitant l'hydrogène, l'oxygène et le principe d'électrolyse, sont utilisés. La maison a d'ailleurs été étudiée durant plusieurs années afin de disposer de données concrètes servant à l'amélioration du concept de maison autonome (Voss et al., 1996).



Figure 1: The self-sufficient solar house, Freiburg (Allemagne) (source: google.com, 2012)

EXEMPLE 2 : MAISON AUTONOME ET SANS FACTURE (FRANCE)

Le seconde cas présenté est représentatif de nombreuses maisons autonomes actuelles. Seuls quatre panneaux photovoltaïques alimentent l'habitation en électricité. De ce fait, les habitants, au nombre de quatre, ne disposent ni de machine à laver, ni de sèche-linge, ni même de réfrigérateur ou d'un quelconque équipement énergivore. La cuisine est au gaz et les occupants fabriquent leur propre biométhane en été, pour l'alimenter. Un four solaire complète l'installation. La lessive se fait quant à elle... en pédalant, système créé par le propriétaire lui-même. L'alimentation en eau s'effectue en pompant l'eau de la source située à 5 mètres de profondeur, utilisée pour la cuisine et l'hygiène corporelle. La famille traite ses eaux usées au moyen d'une phytoépuration. Les toilettes sont des toilettes sèches, et l'engrais formé avec les résidus sert à leur potager. Signalons que les propriétaires ne travaillent pas afin de se consacrer entièrement à leur maison (nature-construction.com, 2012).

¹ Coefficient de performance, traduit le rapport entre l'énergie transférée (la chaleur) et l'énergie consommée pour réaliser le transfert (électricité) (ef4.be, 2012).



Figure 2: Maison autonome et sans facture (France) (source: nature-construction.com, 2012)

SYNTHESE

Il apparaît hors de ces deux exemples que les maisons autonomes couvrent des domaines très vastes, et dont la démarche initiatrice peut être totalement différente, voire opposée. Dans le premier cas, c'est le progrès technologique qui est privilégié, tandis que c'est le désir de limiter son empreinte sur l'environnement qui prime dans le second cas. Le premier exemple le montre, autonomie ne rime pas nécessairement avec écologie. Mais, dans la pratique, les deux sont indissociables. Dans ce souci d'écologie, les occupants des maisons autonomes sont prêts à adopter un mode de vie totalement marginal, à sacrifier une grande partie de leur confort. Chacune de ces deux démarches est extrême et notre objectif, en réalisant ce travail, est d'essayer d'aboutir à un compromis entre ces deux intentions.

Nous chercherons donc à évaluer dans quelle mesure une maison en site isolé peut être rendue autonome, en utilisant des moyens simples. Il ne s'agira pas de technologies de pointe mais de dispositifs maîtrisés et accessibles, en préservant autant que possible le confort de ses habitants. De cette manière, le concept de maison autonome pourrait être élargi et concerner un plus grand nombre de personnes. Nous nous inscrirons également dans une démarche durable et écologique, basée prioritairement sur l'emploi des énergies renouvelables.

A l'issue de ce travail, nous espérons pouvoir apporter une réponse quant à l'accomplissement de ces objectifs.

1.3 METHODOLOGIE

Afin d'appréhender au mieux les différentes problématiques relatives à ce type de projets, le travail a été divisé en plusieurs grandes sections.

La première consiste à poser les bases du projet en exposant le cas d'étude et le contexte général dans lequel il s'insère. Les objectifs qui guideront notre réflexion y seront également décrits.

Le chapitre suivant traitera de l'ensemble des interventions architecturales qui vont devoir être réalisées sur la bâtisse. Du projet architectural et bioclimatique à la réalisation des travaux de réhabilitation, nous connaissons, à la fin de ce chapitre, l'ensemble des données qui nous permettront d'envisager son autonomie.

Nous aborderons ensuite la problématique de l'eau. Les moyens de récolter et de traiter l'eau de pluie afin qu'elle soit exploitable pour les habitants seront exposés. Nous tenterons

d'élaborer une véritable stratégie qui, en fonction des données du projet, permettra de répondre à l'ensemble des besoins.

La thématique de l'électricité sera ensuite étudiée. Nous verrons que, pour définir avec précision une stratégie capable de répondre aux besoins de l'habitation, bon nombre de problématiques connexes devront être préalablement résolues. Il nous faudra ainsi aborder le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et définir l'ensemble des équipements de la maison.

Nous terminerons enfin en synthétisant l'ensemble des résultats obtenus, et en proposant une implantation générale des dispositifs techniques à prévoir en vue de cette autonomie. Nous en profiterons également pour porter un regard critique sur le projet final ainsi que sur les différents paramètres susceptibles d'influencer sa faisabilité.

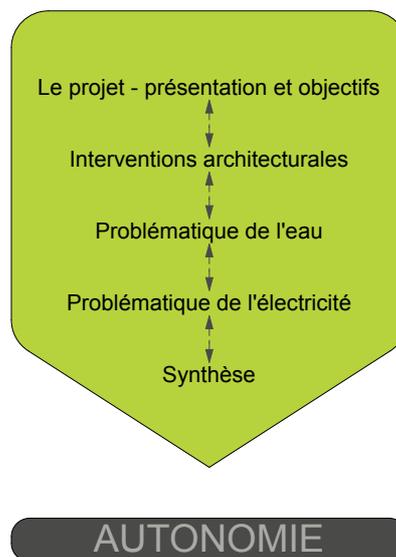


Figure 3: Structure générale du travail (réalisation: Monaco, 2012)

Pour chaque thème, une partie théorique exposera les difficultés ainsi que les enjeux. Nous aborderons les conditions sous lesquelles l'autonomie sera envisageable et effectuerons les choix les plus opportuns à sa réalisation. Nous terminerons par le dimensionnement des équipements, illustrant la pertinence des choix retenus. Les chapitres peuvent être abordés indépendamment les uns des autres, mais c'est une lecture corrélée qui donnera les clés du projet. Nous verrons en effet que chaque partie est susceptible d'interférer sur l'autre et que seule une approche globale permettra une bonne compréhension des solutions retenues.

CHAPITRE 2

LE PROJET PRESENTATION ET OBJECTIFS

2 LE PROJET - PRESENTATION ET OBJECTIFS

2.1 PRESENTATION DU PROJET

Nous avons vu que l'habitation que nous proposons d'étudier s'inscrit dans une démarche très particulière puisqu'il s'agit d'évaluer la faisabilité d'une autonomie en eau et électricité. Afin de cibler les objectifs auxquels doit répondre cette réhabilitation, il est essentiel d'effectuer quelques études préliminaires. Elles permettront une bonne compréhension du projet et du contexte dans lequel il s'inscrit, éléments qui influenceront sans nul doute les choix retenus dans la suite de ce travail.

2.1.1 LOCALISATION

La France se divise en 27 régions et 101 départements. Le bâtiment qui nous intéresse se situe dans le département de la Drôme (26), appartenant à la région Rhône-Alpes, dans le sud-est de la France.



Figure 4: Département de la Drôme, région Rhône-Alpes (réalisation : Monaco ; source : google.com, 2012)

Plus précisément, il a été érigé dans la commune de Grâne. Celle-ci compte une superficie de 45 hectares et une population totale d'environ 1600 habitants. Elle est majoritairement rurale, composée d'un petit village typique et de nombreuses collines parsemées d'habitations diffuses, anciennement agricoles. Cette commune est traversée par un cours d'eau, la Drôme, dont les rivages constituent, sur une portion de quelques kilomètres, une réserve naturelle protégée (Barneron, 2007).



Figure 5: Commune de Grâne, département de la Drôme (réalisation : Monaco ; source : google.com, 2012)

Le cas d'étude est situé sur le versant de l'une de ces nombreuses collines, dans le bois de Noche, au sud du cours d'eau.



Figure 6: Bois de Noche, commune de Grâne (source : Barneron, 2007)

2.1.2 DECOUVERTE DE L'HABITATION

2.1.2.1 BREF HISTORIQUE

Les plus anciennes traces historiques de la bâtisse remontent à l'année 1812, mais il est probable que sa construction soit encore antérieure. Elle est répertoriée sur les cartes Napoléoniennes conservées à la mairie de Grâne, mais il y est également fait référence sur les cartes Minutes d'Etat Major de 1827.



Figure 7: Carte Minute d'Etat Major, 1827 (source : geoportail.gouv.fr, 2012)

Après investigation et consultation de ces cartes Napoléoniennes, nous apprenons que la maison aurait été construite par la famille Montchau, probablement dans le but de développer une activité agricole. Cela expliquerait la subdivision en petites parcelles étroites qui persiste encore aujourd'hui. Selon M. Grimaud, adjoint au Maire de Grâne, elle aurait ensuite appartenu à la famille Martin qui l'aurait vendue à un certain M. Kastenbein, l'arrière-grand-père de Mme. Lavianne, actuelle propriétaire. Durant des années, cette dame et sa famille ont passé l'entièreté de leurs vacances dans la maison de l'aïeul, consacrant temps et argent à son entretien. Suite au décès de M. Kastenbein, la maison est restée totalement inoccupée durant plusieurs années. Mme. Lavianne est finalement devenue propriétaire en 2005. Sa famille et elle, très attachés au bien, souhaiteraient envisager sa réhabilitation afin de la rendre habitable de manière permanente. C'est dans ce cadre que m'a été offerte l'opportunité de réaliser mon travail de fin d'études.

2.1.2.2 ETAT DES LIEUX

Le bâtiment est formée de deux volumes, de deux niveaux chacun, organisés en angle droit. Une partie contenait jadis les locaux de vie, réduits à leur strict minimum, tandis que l'autre servait de grange. A l'époque, des matériaux locaux ont été utilisés pour la construction, tels que des moellons en pierre régionale pour les murs et des tuiles en terre cuite pour la toiture. En outre, les techniques constructives de la région ont été mises en œuvre. On note par exemple la présence de génoises² sur la façade nord. La maison est un habitat de type vernaculaire et s'inscrit donc parfaitement dans l'habitat traditionnel des alentours.

En observant la maison depuis l'extérieur, nous constatons des lignes de rupture verticales dans les murs de façade. Les volumes accolés n'ont également pas toujours la même hauteur. De plus, si l'habitation a été originellement construite en pierre, nous remarquons sur d'anciennes photos que certaines parties ont été recouvertes d'un crépi. Il n'en reste aujourd'hui que quelques traces sur les murs. Ces observations tendent à montrer que la maison a énormément évolué au gré de ses propriétaires successifs.

Les annexes 1 et 3 attestent de ces propos. Les plans de l'habitation dans son état actuel y sont repris, ainsi que de nombreuses photos, actuelles et anciennes. Le lecteur est invité à consulter autant de fois que nécessaire ces annexes afin de valider les propos avancés et les choix que ceux-ci pourront induire dans la suite de ce travail.

Aujourd'hui, l'état général de la maison est délabré. Au fil des années, elle est devenue totalement inhabitable et de gros travaux de rénovation doivent être entrepris.

² Corniches composées de tuiles canal superposées et fixées dans le mortier (source: larousse.fr, 2012).

2.1.2.3 LIMITES PARCELLAIRES

L'extrait du plan cadastral fourni ci-dessous nous renseigne sur les limites précises du terrain d'implantation de l'habitation. Au-delà de la parcelle 63, assiette d'accueil du bâtiment, les parcelles 64, 65, 66, 67, 68 et 69 appartiennent au propriétaire. La parcelle 63 occupe une superficie d'environ 48 ares mais au total, la propriété s'étend sur plus de 150 ares.

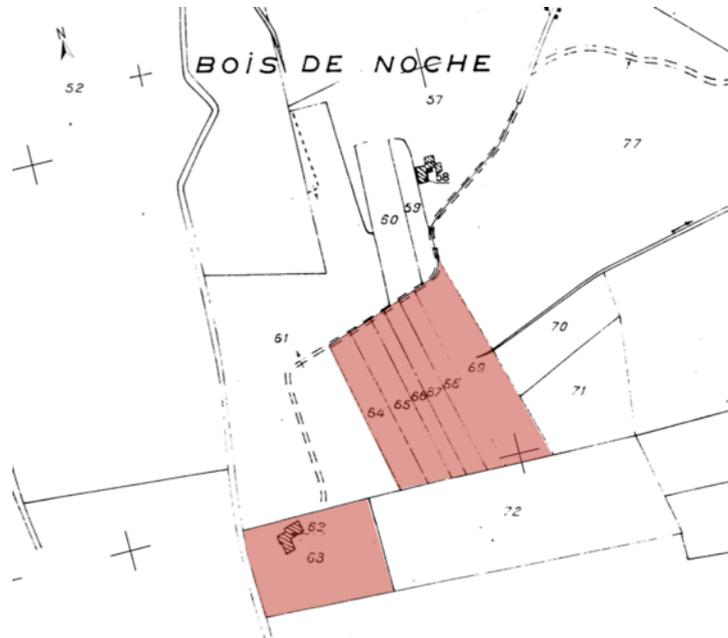


Figure 8: Plan cadastral du bois de Noche (source: geoportail.gouv.fr, 2012)

2.1.3 BREVE ANALYSE DE SITE

Intéressons-nous à présent au site d'implantation. Nous verrons dans la suite de ce travail qu'il joue un rôle important à plusieurs reprises.

CONTEXTE BATI

Dans le voisinage proche, nous observons seulement deux habitations. La première, située au pied de la colline, est habitée de manière permanente par la famille Rey et raccordée aux réseaux publics d'électricité et d'eau. Elle bénéficie en outre du téléphone et dispose d'un système d'évacuation des eaux usées. La seconde habitation, appelée « la Germaine » du nom de son ancienne propriétaire, se situe légèrement en contrebas de la maison qui nous intéresse. Fréquemment louée comme maison de vacances, elle est rendue presque autonome au moyen de techniques sommaires et peu coûteuses. Ainsi, une citerne récolte et filtre les eaux de pluie afin de les réutiliser pour l'hygiène corporelle, celles-ci restant néanmoins impropres à la consommation. Un groupe électrogène a également été installé pour le chauffage de l'eau et l'éclairage, que des bougies viennent régulièrement compléter (lagermaine.over-blog.com, 2012).

ACCESSIBILITE

A partir de la départementale D104, un sentier permet d'accéder aux trois habitations. Il s'agit d'un chemin communal jusqu'à la maison des Rey. Celui-ci se transforme ensuite en chemin d'exploitation privé constitué de graviers desservant les deux habitations restantes. Pour être praticable, l'accès nécessite un entretien régulier de la part des propriétaires.

CONTEXTE NATUREL

La maison se situe au cœur d'une clairière d'un bois composé de feuillus et est éloignée de tout centre dynamique. Le calme et la nature sauvage règnent donc en maître sur les lieux. La façade principale de la maison est orientée vers l'est et offre une vue imprenable sur la vallée. Deux rus encadrent le site par l'est et l'ouest mais ceux-ci, séparés par le bois, ne sont pas visibles et difficilement accessibles. Seule « la Germaine » vient contraster avec le cadre végétal bordant la maison. Malgré cet isolement apparent, il n'est pas rare de croiser des promeneurs s'étant laissés porter au gré des sentiers pédestres du bois de Noche, inscrits au Programme Départemental des Itinéraires de Promenades et Randonnées (P.D.I.P.R.) (Barneron, 2007).

Le schéma suivant illustre le contexte naturel et bâti, ainsi que l'accessibilité au site.

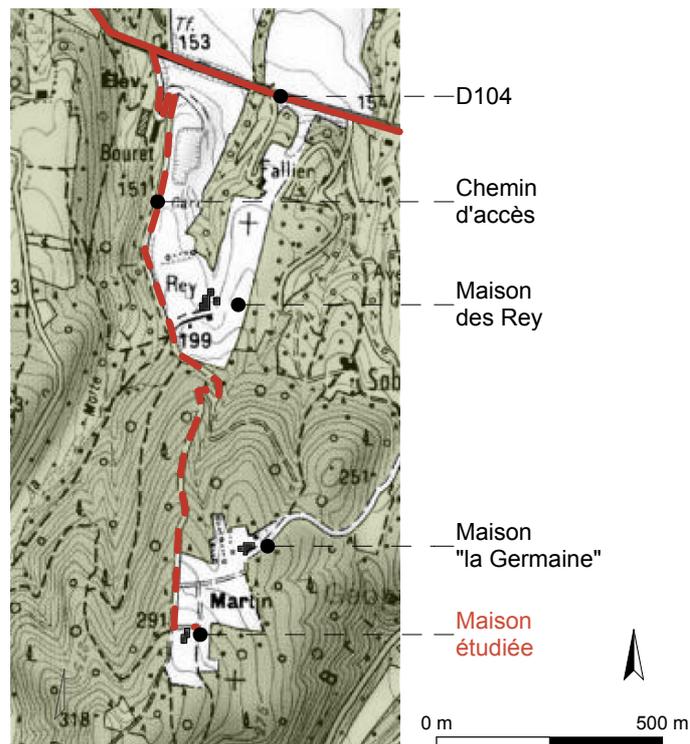


Figure 9: Schéma récapitulatif du contexte naturel et bâti et de l'accessibilité (réalisation : Monaco ; source : geoportail.gouv.fr, 2012)

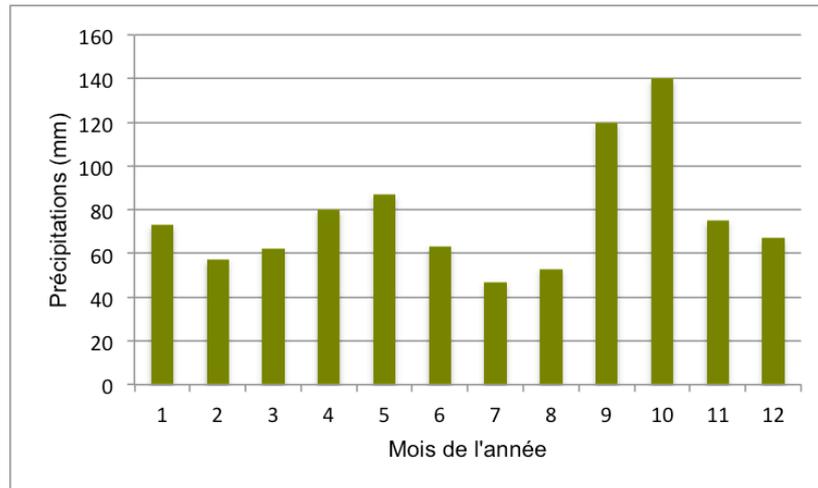
RESEAUX PUBLICS

La maison n'est raccordée à aucun réseau public. Elle ne bénéficie ni d'eau, ni d'électricité, tous deux bloqués à environ un kilomètre en aval de la colline. Selon les renseignements pris par les propriétaires auprès des autorités, la commune prendrait à sa charge les travaux nécessaires à l'établissement d'une ligne téléphonique (résultant d'une ancienne loi encore en activité). Mais, et c'est là que se trouve la contradiction, les frais liés à des travaux pour l'acheminement de l'eau et de l'électricité seraient à leur charge. De plus, l'altitude de la maison (275 mètres) est supérieure à celle du château d'eau alimentant les alentours. Le raccordement nécessiterait donc l'installation d'une pompe de relevage de puissance relativement conséquente, engendrant des coûts supplémentaires.

CONDITIONS CLIMATIQUES ET AUTRES DONNEES

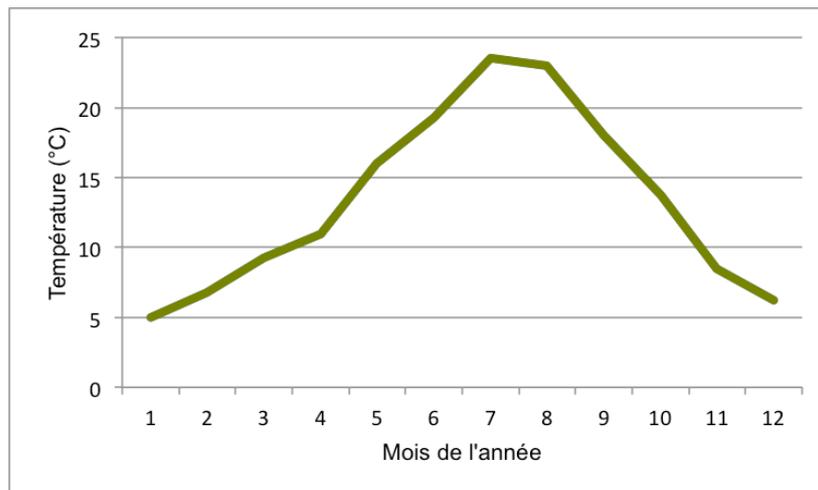
La région présente un climat méditerranéen à influence continentale, caractérisé par une pluviométrie annuelle relativement importante et répartie sur les douze mois de l'année.

Nous pouvons cependant constater une diminution des pluies durant l'été et une recrudescence en automne, résultant de l'influence méditerranéenne. Le total annuel des précipitations s'élève à 924 millimètres.



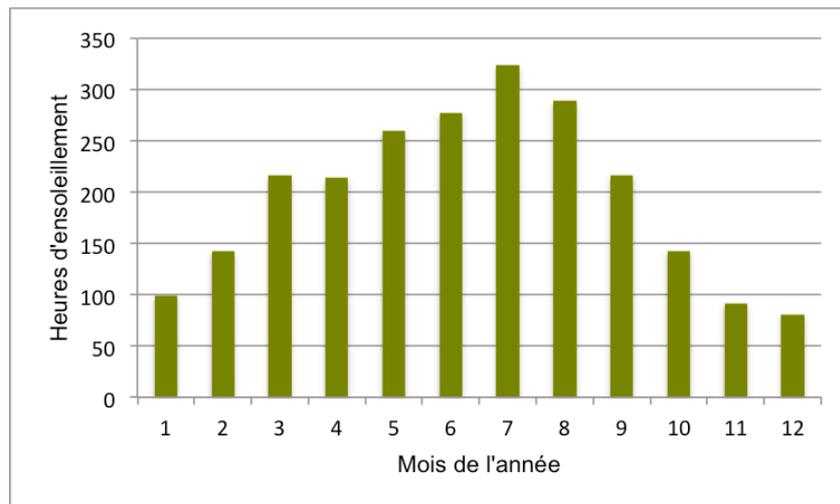
Graphique 1: Précipitations mensuelles – Montélimar, Drôme (réalisation : Monaco ; source : meteofrance.com, 2012)

L'analyse du diagramme des températures mensuelles révèle quant à lui que les températures sont douces en hiver et élevées en été. La moyenne annuelle est d'environ 13,4°C.



Graphique 2: Températures mensuelles - Montélimar, Drôme (réalisation : Monaco ; source : meteofrance.com, 2012)

La région bénéficie également d'un bon potentiel d'ensoleillement, avec un nombre total d'heures d'ensoleillement de 2354 heures par an. Le nombre de jours à fort ensoleillement est estimé à 106 contre 94 de faible ensoleillement.



Graphique 3: Heures d'ensoleillement - Montélimar, Drôme (réalisation : Monaco ; source : meteofrance.com, 2012)

Deux vents majeurs pouvant parfois s'avérer violents soufflent sur la région. Il s'agit du mistral, vent du nord qui assèche l'air, et du marin, vent du sud plutôt doux et humide. Cependant, étant donné la géométrie du site dans lequel s'implante l'habitation, nous pouvons supposer que cette dernière ne sera que très peu exposée au vent marin (meteofrance.com, 2012).

A priori, le site bénéficie donc de conditions climatiques propices à la réalisation d'une habitation autonome. Les gisements solaire et éolien semblent prometteurs, les précipitations sont relativement élevées et les températures se montrent clémentes. La suite de ce travail révélera avec plus d'exactitude les réels atouts du site.

CONTEXTE URBANISTIQUE ET LEGISLATIF

La France dispose d'un système législatif relativement complexe puisqu'il convient de tenir compte de considérations aux échelles nationale, régionale, départementale et, parfois même, communale.

Dans le domaine du bâtiment, les performances énergétiques sont régulées par la Réglementation Thermique (RT), mise en œuvre par le Grenelle de l'environnement³. Depuis début 2012, tous les bâtiments neufs doivent présenter une consommation d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/m²/an (contre 150 kWh/m²/an dans la réglementation précédente datant de 2005). Cependant, ces exigences globales ne s'appliquent pas aux bâtiments rénovés de moins de 1000 m² pour lesquels seules les performances locales importent. Ainsi, tout équipement installé ou remplacé, toute modification effectuée, devra répondre aux normes en vigueur.

Les considérations urbanistiques du site sont quant à elles régies par le Plan local d'Urbanisme de la commune de Grâne (Barneron, 2007). Celui-ci nous renseigne sur les transformations de l'enveloppe. Il nous indique également que les parcelles concernées sont localisées en zone N, définie comme étant une « zone protégée en raison de son caractère naturel, de la qualité des sites, des milieux naturels, des paysages et de leur intérêt notamment du point de vue esthétique et écologique ». Au-delà de la réhabilitation de la bâtisse, une attention toute particulière doit donc être portée à son contexte.

³ Le Grenelle de l'environnement réunit l'Etat et les représentants de la société civile afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, de l'aménagement et du développement durables. Il a été créé en 2007 à l'initiative de Nicolas Sarkozy (legrenelle-environnement.fr, 2012).

De manière générale, toutes les prescriptions dont nous avons connaissance seront prises en compte dans l'élaboration de ce projet.

2.1.4 CONCLUSIONS

En résumé, retenons de cette section les quelques points suivants qui vont déterminer le cadre d'étude de ce mémoire :

- Si la maison n'a jusqu'alors été habitée que de manière intermittente par ses propriétaires, l'étude de faisabilité sera réalisée en considérant une occupation permanente de 6 personnes.
- Les conditions climatiques, urbanistiques et législatives auront une influence directe sur la philosophie et les pistes de réflexion adoptées. En effet, ces facteurs externes ont une importance fondamentale quant à la faisabilité d'un projet de ce type. Il est donc essentiel de garder ces quelques réflexions à l'esprit.
- Malgré de nombreuses recherches sur le site d'implantation, certaines données pourraient venir à manquer. Il n'est pas rare en effet, lors de la réalisation de projets de ce type, de mener quelques études préalables in situ (essais de sol,...). De même, certaines données seront introduites au fur et à mesure que leur utilité s'en fera ressentir.

Ces remarques à l'esprit, nous disposons désormais d'une base concrète pour élaborer les principaux objectifs qui nous guideront tout au long de ce projet de réhabilitation autonome.

2.2 OBJECTIFS

Avant d'envisager concrètement la réalisation du projet, il est essentiel de s'interroger sur les objectifs à atteindre. Pour développer un projet efficace et abouti, celui-ci doit être abordé dans sa globalité. De cette manière, le projet proposé sera le fruit d'une réflexion dans divers domaines tels que l'aspect architectural, les considérations environnementales et les performances thermiques.

2.2.1 OBJECTIFS EN MATIERE D'ARCHITECTURE

Comme évoqué précédemment, le cas d'étude est un habitat typique de la Drôme, utilisant des matériaux régionaux et des techniques constructives locales. Il possède ainsi un intérêt patrimonial indéniable. Le projet proposé se devra de respecter, dans la mesure du possible, la nature même de l'habitation, à savoir ses matériaux, son esthétique, la manière dont il s'insère dans son site et le mode de fonctionnement qui le caractérise. Il devra également répondre aux exigences les plus strictes en matière de confort pour ses habitants, qu'il s'agisse du confort hygrothermique, acoustique ou visuel.

2.2.2 OBJECTIFS EN MATIERE D'ENVIRONNEMENT

A l'heure où l'écologie est au centre de toutes les attentions, il semble inconcevable de ne pas tenir compte de l'aspect environnemental lors d'un projet de rénovation et, à plus grande échelle encore, pour toute conception architecturale. C'est d'autant plus vrai dans un projet

d'autonomie dont l'intention première, comme nous l'avons vu précédemment, est de limiter son empreinte sur l'environnement.

Des matériaux employés aux techniques constructives mises en œuvre, une attention toute particulière devra être portée au respect de l'environnement et du cadre naturel entourant le projet. L'habitation est en effet édiflée au beau milieu d'un site naturel jusqu'ici préservé de l'action néfaste de l'Homme.

2.2.3 OBJECTIFS EN MATIERE DE PERFORMANCE THERMIQUE

Le projet développé dans le cadre de ce mémoire n'a pas pour but, nous verrons pourquoi, d'atteindre un standard énergétique bien particulier. En effet, la logique n'est pas tout à fait la même selon que l'on désire réaliser une rénovation énergétique ou une habitation capable de se suffire à elle-même. Le bâtiment doit cependant être entièrement réhabilité et, dans ce contexte, nous avons tout intérêt à nous intéresser à ses performances thermiques.

2.2.3.1 LES STANDARDS ENERGETIQUES

Trois standards existent en matière de rénovation énergétique (de Meester, 2009) :

- *Le standard basse énergie* : celui-ci correspond plus ou moins à un niveau K30. Le besoin annuel de chauffage est inférieur à $60 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}^4$
- *Le standard très basse énergie* : le besoin annuel de chauffage est inférieur à $30 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$
- *Le standard passif* : celui-ci exige que le besoin spécifique de chauffage annuel soit inférieur à $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$. L'étanchéité du bâtiment doit être très performante et atteindre un niveau n50 inférieur à $0,6 \text{ h}^{-1}$, valeur indiquant le taux de renouvellement d'air par heure sous un différentiel de pression de 50 Pascal (révélé via le test Blower Door). Il est à noter que le taux de renouvellement d'air moyen dans la construction belge est d'environ $n50 = 7,8 \text{ h}^{-1}$. Le pourcentage de surchauffe du bâtiment ($T_{\text{int}} > 25^\circ\text{C}$) doit quant à lui être inférieur ou égal à 5%.

Le standard passif est difficile à atteindre lors d'une rénovation. S'il est devenu une réalité en matière de nouvelle construction, il demande la mise en œuvre de techniques constructives et d'équipements techniques non conventionnels dont la mise en œuvre peut s'avérer problématique en rénovation.

Les standards basse énergie s'avèrent quant à eux tout à fait envisageables en rénovation. Quelques principes, facilement applicables, permettent de s'en rapprocher :

- Une très bonne isolation de l'enveloppe,
- Du double vitrage basse émissivité ($U < 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le vitrage et la menuiserie),
- Une bonne étanchéité de l'enveloppe : $n50 = 2 \text{ h}^{-1}$ pour une ventilation naturelle et $n50 = 1 \text{ h}^{-1}$ pour une ventilation mécanique,
- Un système de chauffage performant,
- Limiter les ponts thermiques.

⁴ Cette performance a été choisie sur base des définitions les plus souvent utilisées dans les différents pays européens.

2.2.3.2 POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX STANDARDS ENERGETIQUES

Rappelons que, dans le cadre de ce travail, les standards énergétiques sont avant tout un moyen de nous positionner mais qu'ils ne constituent pas un objectif en soi.

Dans une maison autonome, le but n'est pas de minimiser les besoins en chauffage, mais ceux en électricité (et, dans une autre mesure, ceux en eau). Or, les standards énergétiques sont définis par la volonté de réduire ce que coûte les besoins en chauffage. Cela entraîne parfois, comme dans le cas des bâtiments passifs, la nécessité d'équipements spécifiques comme une ventilation mécanique contrôlée, alors que ce poste est un important consommateur d'électricité. Il nous faut donc prendre du recul par rapport à ces labels. Le contexte dans lequel s'inscrit ce travail constitue ainsi une approche non conventionnelle du bâtiment et l'objectif principal, l'autonomie totale, ne doit pas être perdu de vue.

2.2.4 CONCLUSIONS

Cette partie du travail a servi à définir clairement les objectifs majeurs qui guideront nos réflexions et nos choix tout au long du projet. Ces desseins concernent tant le domaine architectural qu'environnemental ou énergétique.



Figure 10: Objectifs pour l'autonomie (réalisation : Monaco, 2012)

Néanmoins, tous n'auront pas le même impact sur les choix que nous opérerons. En effet, il ne semble a priori pas simple de rendre une habitation sans eau ni électricité totalement autonome. Pour cette raison, cet objectif primera parfois sur l'aspect architectural et environnemental et engendrera assurément une série de compromis dans ces domaines.

CHAPITRE 3

INTERVENTIONS ARCHITECTURALES

3 INTERVENTIONS ARCHITECTURALES

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre, qui porte sur les interventions architecturales, a pour objectif de jeter les bases du projet. Cette étape est fondamentale puisqu'elle permettra de fixer une situation et d'ainsi évaluer, dans la suite de ce travail, le degré d'autonomie qu'il sera possible d'atteindre.

Dans un premier temps, il convient de concevoir le projet architectural en adéquation avec les principes bioclimatiques. Ceux-ci consistent en des moyens simples à mettre en œuvre qui, s'ils sont abordés suffisamment à l'amont d'un projet, permettent de réduire significativement ses besoins énergétiques tout en contribuant au confort.

Au-delà de ces considérations qualitatives, des choix en matière de performances thermiques doivent être établis. Le traitement de l'enveloppe est une étape inévitable de tout projet de réhabilitation. Ce n'est qu'une fois ces choix fixés que nous pourrions réellement évaluer les besoins de l'habitation, et envisager concrètement les réponses possibles.

3.2 CONCEPTION ARCHITECTURALE ET BIOCLIMATIQUE

3.2.1 LE PROGRAMME

L'habitation sera prévue afin de pouvoir accueillir jusqu'à huit personnes. Composée de cinq individus, la famille Lavianne reçoit régulièrement des amis. Il est donc important de prévoir un confort suffisant au sein des espaces communs et privés, permettant une bonne cohabitation entre les résidents. Amateurs de cuisine et adeptes d'activités en famille, l'aménagement proposé devra correspondre à leur mode de vie.

Le programme retenu est le suivant :

- Un sas d'entrée avec vestiaire et WC,
- Une grande cuisine avec rangements et une salle à manger toute proche permettant aux invités d'interagir avec leurs hôtes,
- Un salon centré sur la convivialité plutôt que sur la télévision,
- Un espace modulable pouvant servir au jeu ou à la détente,
- Trois chambres permettant aux résidents de bénéficier d'un peu d'intimité,
- Une salle de bain commune,
- Un espace dédié aux invités avec chambre et salle de bain indépendante,
- Une buanderie avec espace de séchage,
- Un espace technique capable d'accueillir tous les équipements nécessaires à l'élaboration du projet,
- Un espace extérieur convivial, en interaction avec l'habitation et permettant des activités diverses.

Le projet finalement proposé est somme toute assez classique, mais se veut efficace. Il place au centre de la réflexion les principes bioclimatiques, qui seront développés dans la section suivante, et accorde également une attention toute particulière au confort de l'habitation, à l'organisation de ses espaces ainsi qu'à la préservation du bâti. Les

documents relatifs au projet sont consultables à l'annexe 4. Le lecteur est invité à s'y référer aussi souvent qu'il le désire afin d'avoir une vision précise de la situation.

3.2.2 LA CONCEPTION ARCHITECTURALE

3.2.2.1 L'ORGANISATION SPATIALE

L'organisation spatiale du bâtiment a été totalement repensée. En effet, seulement la moitié de la surface totale disponible était initialement consacrée aux espaces de vie, le reste servant de réserve pour l'ancienne fonction agricole. Désormais, les espaces de vie occupent l'entièreté de la maison. L'organisation des espaces a été imaginée pour faciliter les circulations et favoriser la vie en communauté tout en essayant de préserver l'intimité de chacun. La cuisine, par exemple, communique visuellement avec le salon, mais leur éloignement favorise la diversité des activités et crée des ambiances variées. Les chambres disposent toutes d'espaces de lecture ou de travail afin que chacun puisse vaquer à ses propres occupations. La terrasse est quant à elle traitée comme une véritable prolongation de l'habitation afin que les habitants puissent en jouir à leur guise durant l'été. Au final, cette habitation se veut conviviale et confortable.

3.2.2.2 LA STRUCTURE

Au niveau structurel, tous les murs porteurs ont été conservés. Seuls deux d'entre eux ont vu leurs baies agrandies afin, comme expliqué précédemment, de favoriser la convivialité de l'espace de vie. Préserver la structure ancestrale du bâtiment permet de conserver son caractère et son essence tout en favorisant une meilleure lecture et compréhension des espaces.

Si les murs porteurs ont pu être conservés, d'autres éléments devront par contre être remplacés. Les planchers, par exemple, sont trop endommagés et devront être entièrement renouvelés. Nous en profiterons pour tous les aligner afin d'éviter toute différence de niveau au sein de l'habitation. Il en sera de même pour la dalle sur terre-plein du rez-de-chaussée. En ce qui concerne la toiture, seule la partie au-dessus de l'ancien volume principal sera remplacée, le reste ayant été rénové récemment. L'ensemble de ces travaux sera détaillé au sein du chapitre traitant des interventions de l'enveloppe.

3.2.2.3 LES BAIES

L'habitation initiale présentait très peu d'ouvertures. En effet, ce principe constructif ancestral présente le double avantage de préserver la fraîcheur en été tout en évitant les déperditions en hiver. Cependant, les progrès techniques réalisés en matière de châssis limitent aujourd'hui les effets défavorables des baies, permettant ainsi de tirer profit d'autres avantages tels que l'apport de lumière naturelle et de chaleur solaire. Les baies ont donc été entièrement repensées et les châssis seront remplacés par des dispositifs modernes et plus performants. Les pierres de façade dégagées pour créer ces baies serviront à en reboucher d'autres. Comme la surface vitrée est désormais supérieure à celle de la configuration initiale, nous ne devrions pas en manquer.

3.2.3 LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

« Concevoir bioclimatique, c'est renouer avec l'art de bâtir en symbiose avec l'environnement, la nature, le site d'implantation de la maison, la course du soleil. C'est retrouver quelques règles de bon sens. » (de Meester, 2009)

La conception bioclimatique est donc une étape de la conception architecturale inhérente à tout projet de rénovation basse énergie. Elle l'est encore davantage dans le cas d'une habitation autonome puisqu'en valorisant les conditions climatiques et géographiques du site, il sera possible de bénéficier d'une énergie gratuite. Cette énergie ne devra pas être produite par l'habitation et constitue donc une alternative intéressante dans ce type de projet. En concevant bioclimatique, nous favorisons une diminution significative des besoins énergétiques de l'habitation.

Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que, lors d'une rénovation, l'architecte est tributaire de certaines données invariables, propres au projet, telles que l'orientation de l'habitation ou encore son contexte naturel et bâti.

3.2.3.1 LES PRINCIPES BIOCLIMATIQUES

La conception bioclimatique se base sur six grands principes brièvement décrits ci-dessous (De Herde & Liébard, 2005).

CAPTER

Cela revient principalement à ouvrir l'habitation vers le sud par l'intermédiaire de baies. Pour capter au mieux le rayonnement solaire, il convient d'étudier la course du soleil, qui varie en fonction de la position géographique du bâtiment. Ce dernier peut dès lors bénéficier au maximum des apports solaires gratuits.

CONSERVER

La compacité joue un rôle important dans la conservation de la chaleur mais, en rénovation, il n'est pas possible d'intervenir sur cet aspect du bâtiment. Dès lors, cela passe avant tout par l'isolation de l'enveloppe. D'autres moyens simples peuvent être mis en œuvre comme, par exemple, la conception d'un SAS d'entrée qui permet d'isoler la maison du froid en hiver.

STOCKER

Le fait de stocker la chaleur permet de minimiser les écarts de température entre le jour et la nuit, augmentant ainsi le confort de l'habitation tant en hiver qu'en été. La capacité de stockage d'un matériau dépend de son inertie. Seuls les premiers centimètres importent puisqu'au-delà la chaleur ne pénètre pas.

DISTRIBUER

La distribution de la chaleur permet une homogénéisation de la température au sein de l'habitat. Elle limite les risques de surchauffe dans les pièces exposées en faisant bénéficier les autres pièces de cet apport excédentaire de chaleur. La notion de distribution favorise donc le confort thermique d'une maison. Une bonne distribution est favorisée par un effet cheminée ou par le principe de thermocirculation.

SE PROTEGER

Il s'agit là de se protéger de tous les aspects du climat, tant le froid et le vent hivernal que les pluies ou les apports solaires indésirables en été. Ce dernier point demande une attention particulière car, qu'il s'agisse de protections solaires mobiles ou fixes, construites ou naturelles, il faut toujours pouvoir assurer une vue vers l'extérieur et des apports en lumière naturelle suffisants.

DISSIPER

La dissipation de la chaleur peut être régulée par un gradient de température ou de pression. Elle s'opère sous différentes formes, à savoir la ventilation unilatérale ou, plus efficace, la ventilation transversale. Il est également possible de créer un effet de cheminée.

Chacun de ces six principes est susceptible d'induire des conséquences sur l'esthétique de l'habitation. C'est pourquoi la conception bioclimatique doit être pensée en adéquation avec le projet architectural.

3.2.3.2 LE BIOCLIMATISME APPLIQUE AU PROJET

Nous allons maintenant développer ces différentes stratégies bioclimatiques dans le cadre du projet étudié.

STRATEGIE D'HIVER

Dans la Drôme, l'hiver n'est certes pas aussi rigoureux que chez nous, mais les températures peuvent néanmoins être très basses. Il importe donc de se protéger du froid et de profiter des apports solaires gratuits.

CAPTER

Pour ce faire, une grande baie vitrée orientée SSE permet de capter le rayonnement solaire. La hauteur de la baie est supérieure à celle d'un étage grâce à la présence d'une mezzanine, ce qui permet l'irradiation plus en profondeur dans la pièce.

STOCKER

Les rayonnements solaires sont absorbés par le carrelage en terre cuite qui recouvrira l'entièreté du sol du rez-de-chaussée, par les murs en pierre transversaux ainsi que par le mur de maçonnerie élevé dans le fond de la pièce. Les matériaux, denses et lourds, ont une inertie élevée ce qui va permettre de restituer la chaleur avec un déphasage de plusieurs heures et ainsi, chauffer l'atmosphère une partie de la nuit. Durant l'été, cette inertie permettra de limiter les surchauffes. De manière générale, l'habitation dispose d'une très grande inertie puisque les murs intérieurs sont en pierre. Cette inertie participe de manière intégrante au confort thermique de l'habitation.

DISTRIBUER

L'espace de captage se situe en position centrale par rapport aux espaces de vie et même à l'habitation toute entière. Au rez-de-chaussée, la cuisine et le salon bénéficient directement de la chaleur restituée par la dalle. La mezzanine forme avec la cage d'escalier une boucle permettant la mise en œuvre du principe de thermocirculation, assurant une bonne distribution de l'air chaud.

CONSERVER

Ne disposant ici d'aucune emprise sur la compacité du volume, la conservation de la chaleur passe avant tout par les performances thermiques de l'enveloppe. Ce thème, d'autant plus complexe dans le cadre d'une rénovation, mérite toute notre attention. C'est pourquoi une section complète lui est entièrement dédiée (cf. 3.3 *Le traitement de l'enveloppe*).

Quelques interventions simples ont cependant été réalisées, tout d'abord via la création d'un sas d'entrée permettant une coupure nette entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitation. Ensuite via le zonage des fonctions, puisque les locaux techniques, fonctionnant comme des espaces tampons, ont été disposés sur la face nord du bâtiment. Dans la cuisine, une

rangée d'armoires remplit la même fonction et évite ainsi la sensation de paroi froide. Les baies ont quant à elles été réduites à leur strict minimum en façade nord.

Le schéma suivant récapitule les principes bioclimatiques mis en œuvre pour la stratégie d'hiver.

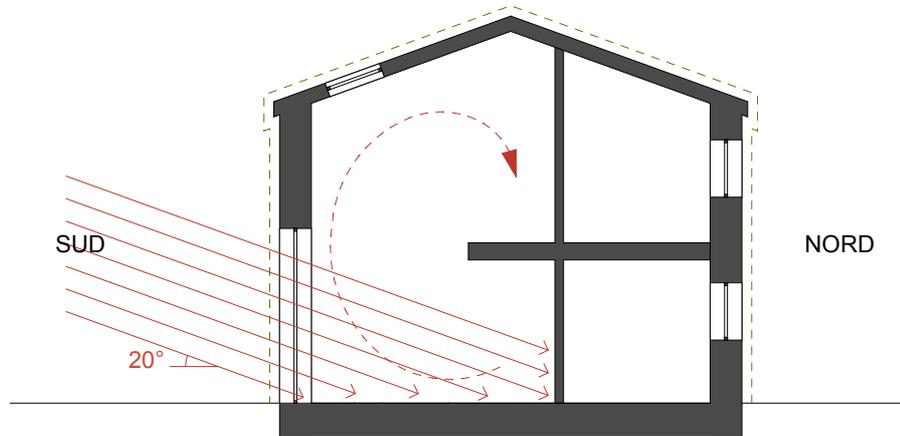


Figure 11: Stratégie d'hiver (réalisation : Monaco, 2012)

STRATEGIE D'ETE

Durant l'été, les températures peuvent très régulièrement dépasser les trente degrés à l'ombre et se protéger de la chaleur devient un objectif primordial pour les habitants du sud de la France.

SE PROTEGER

Des protections solaires mobiles extérieures ont été intégrées à la conception. Elles sont formées de lattes orientables de sorte que, même lorsqu'il est nécessaire de contrôler l'apport solaire, les locaux puissent toujours bénéficier de lumière naturelle et d'une vue vers l'extérieur. Il s'agit de stores vénitiens externes montés sur rails. Ils seront choisis en bois afin de respecter le caractère naturel de l'habitation. Ils n'offrent pas une grande sécurité contre l'effraction ni une résistance additionnelle au vitrage en hiver. Par conséquent, seules les baies orientées vers le sud et l'est en seront équipées.



Figure 12: Stores vénitiens extérieurs (source : google.com, 2012)

DISSIPER

Bien que les percements de la façade nord soient réduits, quelques ouvertures bien placées, notamment dans la cuisine et le hall de nuit, permettent une circulation d'air selon l'axe nord-

sud. De manière générale, chaque pièce bénéficie d'éclairage naturel, ce qui offre la possibilité de multiples courants d'air entre locaux, à condition que des grilles de transfert soient prévues dans les portes. Une baie de toiture permet également la dissipation de chaleur au moyen d'un effet cheminée. Afin d'évacuer la chaleur accumulée pendant les journées d'été, le principe de ventilation nocturne intensive sera mis en œuvre.

Le schéma suivant récapitule les principes bioclimatiques mis en œuvre pour la stratégie d'été.

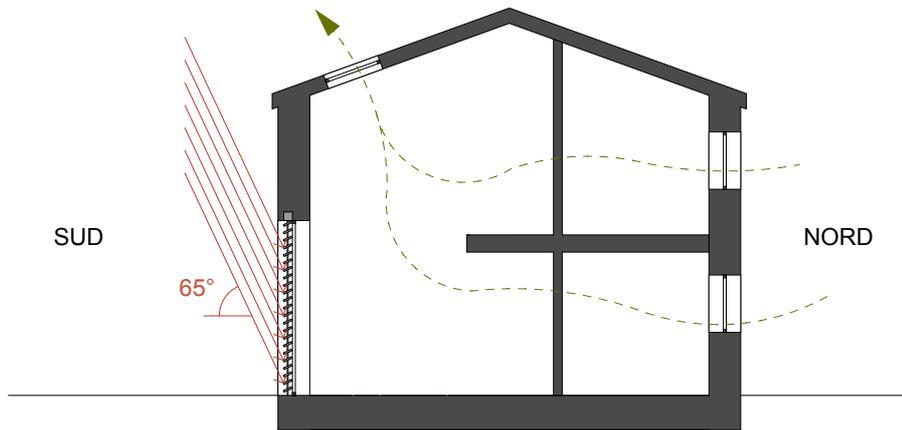


Figure 13: Stratégie d'été (réalisation : Monaco, 2012)

3.2.4 L'ÉCLAIRAGE NATUREL

L'élaboration d'une stratégie d'éclairage naturel occupe également un rôle tout particulier durant la phase de conception du projet. En effet, au-delà du fait que la lumière naturelle a un impact fort sur le confort des habitants, une bonne gestion de cette dernière permettra une diminution de la consommation en éclairage artificiel et, de là, réduira les besoins en électricité de l'habitation.

3.2.4.1 NOTIONS DE LUMIÈRE NATURELLE

La lumière naturelle se compose de trois grandes composantes que sont la lumière directe du soleil, la lumière réfléchiée par l'environnement extérieur et la lumière réfléchiée par l'environnement intérieur. Ses caractéristiques varient selon les conditions météorologiques, le moment de l'année et celui de la journée.

L'éclairage naturel participe au confort visuel des occupants d'un local. De nombreux paramètres entrent en compte dans l'évaluation de ce confort comme par exemple la répartition de la lumière dans l'espace, l'absence d'ombres gênantes, la teinte de la lumière, le rendu des couleurs, l'absence d'éblouissement,... Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales de ces paramètres. Ce confort visuel est influencé par le type de tâche à accomplir et par la configuration du lieu. Des paramètres personnels (psychologie, physiologie), culturels et historiques entrent également en ligne de compte. Ajoutés au fait que la lumière varie constamment, il est généralement nécessaire de faire appel à des modèles informatiques relativement complexes (De Herde & Liébard, 2005). C'est pourquoi les mesures développées dans ce projet et explicitées au paragraphe suivant sont purement qualitatives.

3.2.4.2 LA STRATEGIE D'ECLAIRAGE NATUREL DANS L'HABITATION

Le premier élément consiste à privilégier l'apport de lumière naturelle dans chaque local, même pour les espaces de service. Cela participe non seulement au confort des habitants, mais permet également de réduire les besoins en éclairage artificiel. Ainsi, même la buanderie et l'espace technique bénéficient d'une baie. Les toilettes du rez-de-chaussée sont quant à elles éclairées indirectement au moyen d'une vitre sablée placée dans la porte, profitant de l'éclairage naturel du sas d'entrée.

La géométrie de l'habitation est telle que certaines pièces, malgré la mise en place de baies en façade, risquaient d'être trop sombres. C'est le cas de la cuisine et de la salle de bain attenante à la chambre d'amis. Pour résoudre cela, les apports de lumière indirecte ont été favorisés. Dans la cuisine par exemple, les portes du sas et du couloir menant à la chambre seront vitrées. La grande baie de captage permet en outre un apport de lumière naturelle supplémentaire profitable à l'ensemble de la zone de vie. Afin de favoriser une bonne répartition de la lumière naturelle dans les différentes pièces de la maison, la plupart d'entre elles (chambre, cuisine, salon, hall de nuit) bénéficient de deux baies, orientées selon deux directions différentes.

Grâce à ces quelques mesures en adéquation avec les principes bioclimatiques, le bâtiment devrait bénéficier d'un apport suffisant de lumière naturelle.

3.2.5 CONCLUSIONS

En intégrant dès le début du projet ces quelques principes, il est possible de concevoir un projet à la fois architecturalement et énergétiquement intéressant, dont les divers composants, de l'organisation des locaux aux baies qui les éclairent, se complètent. Dans tout projet, il est donc essentiel de privilégier une approche conceptuelle qualitative avant d'aborder les points techniques qui y sont relatifs.

3.3 LE TRAITEMENT DE L'ENVELOPPE

La maison que nous désirons réhabiliter est, nous l'avons vu, une maison entièrement en pierre de type vernaculaire. Dans une maison ancienne de ce type, les murs, les sols et les éléments de toiture sont constitués de matériaux naturels. L'enveloppe n'est pas parfaitement étanche et l'humidité qui s'y introduit est constamment asséchée grâce à la circulation naturelle de l'air au travers des matériaux constitutifs. Il s'agit d'une maison qui « respire » et dont le principe de fonctionnement se base en priorité sur sa capacité à stocker la chaleur et la fraîcheur afin de la restituer ultérieurement.

Aujourd'hui, nous assimilons souvent les structures anciennes à une mauvaise isolation et à des critères de confort obsolètes. Nous imaginons que la meilleure manière d'améliorer le confort thermique est de doubler les parois d'un isolant, de rendre étanches les ouvertures et de contrôler tout échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la maison. Cette habitation possède pourtant son propre mode de fonctionnement, qui ne correspond certes plus aux conventions actuelles, mais grâce auquel elle a perduré jusqu'à ce jour. Faire fi de ces caractéristiques pourrait engendrer l'apparition de graves désordres structurels pour la maison et des risques pour la santé des habitants (Le Goarnig, 2008).

La section suivante, traitant de l'ensemble des modifications à opérer sur l'enveloppe, entend donc s'inscrire dans un respect total de l'existant. Tant dans le choix des matériaux que dans les techniques mises en œuvre, la réalisation de ce projet se fera dans une

démarche durable, respectueuse non seulement du bâtiment mais également de son environnement.

3.3.1 L'ISOLATION THERMIQUE

Dans le département de la Drôme, les températures moyennes minimales avoisinent les 4°C. Elles tombent rarement sous la barre du zéro, mais justifient néanmoins de favoriser une bonne isolation de l'enveloppe. Ce choix se confirme d'autant plus qu'il est important de minimiser les besoins énergétiques de l'habitation. Or, il est admis qu'une isolation bien conçue permet de diminuer significativement les besoins en chauffage d'une habitation tout en améliorant le confort de ses habitants.

Isoler une maison existante s'avère être une étape complexe d'une rénovation. Selon les choix adoptés, cela peut entraîner la réalisation de travaux parfois lourds et coûteux, susceptibles de modifier la nature intrinsèque de l'habitation. Plus que jamais, il est donc essentiel de ne pas perdre de vue la démarche durable dans laquelle nous désirons nous inscrire.

3.3.1.1 LES MODES D'ISOLATION

Dans un premier temps, il est essentiel de s'interroger quant au mode d'isolation. Si, en construction neuve, l'isolation par l'extérieur est généralement préconisée, la question doit être étudiée de manière plus détaillée dans le cas d'une rénovation.

Dans ce domaine, il existe plusieurs options permettant d'isoler une habitation. Celle-ci peut être isolée par l'extérieur, par l'intérieur ou encore de manière mixte. Chacune de ces méthodes présente ses propres avantages et inconvénients et doit être étudiée de manière détaillée.

De manière générale, il est toujours plus profitable pour un bâtiment d'être isolé par l'extérieur. Cela permet d'éviter tout risque de condensation, de limiter la formation de ponts thermiques ainsi que la perte de l'inertie et une diminution de l'espace habitable, inconvénients automatiquement associés à l'isolation par l'intérieur. Dans la pratique, l'isolation par l'extérieur d'un bâtiment n'est cependant pas toujours réalisable. A titre d'exemple, les façades des bâtiments sont généralement soumises à des prescriptions urbanistiques (alignement, matériaux, homogénéité du front bâti) qui n'autorisent pas ce mode d'isolation. Dès lors, certaines habitations sont parfois isolées de manière mixte. La façade avant est isolée par l'intérieur tandis que la façade arrière et les éventuels pignons, moins visibles depuis la rue, peuvent être isolés par l'extérieur. La jonction des murs isolés de manière mixte est alors un point sensible de l'habitation et il faut favoriser un recouvrement de l'isolant pour éviter l'apparition de ponts thermiques (de Meester, 2009).

En bref, le tableau suivant récapitule les avantages et inconvénients de ces deux méthodes.

Mode d'isolation	Avantages	Inconvénients
Par l'extérieur	<ul style="list-style-type: none"> › Risque de ponts thermiques réduit › Protection du mur contre le gel et les fissurations › Protection du mur contre la pénétration de la pluie battante › Amélioration de l'aspect extérieur en cas de revêtement extérieur dégradé › Conservation de l'inertie thermique › Conservation des volumes et des finitions intérieures › Pas de désagrément si les locaux restent habités durant les travaux 	<ul style="list-style-type: none"> › Modification de l'aspect extérieur – demande de permis d'urbanisme › Solution coûteuse puisqu'elle implique un nouveau parement › Surépaisseur parfois problématique › Isolation du retour de la baie – seuil remplacé – déplacement des descentes d'eau – ... › Risque de ponts thermiques aux jonctions mur-sol
Par l'intérieur	<ul style="list-style-type: none"> › Aspect extérieur conservé – pas de demande de permis d'urbanisme › Coût généralement moins élevé › Continuité avec les baies assurée plus facilement 	<ul style="list-style-type: none"> › Ponts thermiques délicats à résoudre (jonction mur-dalle,...) › Dégradation possible du mur extérieur suite à son refroidissement et son humidification – risque de fissuration › Volumes intérieurs diminués › Perte de l'inertie thermique › Risque de condensation interne › Adaptation des tablettes de fenêtres, déplacement des radiateurs,...

Tableau 1: Récapitulatif des avantages et inconvénients des différents modes d'isolation (réalisation : Monaco ; source : de Meester, 2009)

Dans le cadre de ce projet, nous favoriserons l'isolation de l'enveloppe par l'extérieur. Ce choix peut paraître radical, mais il s'impose puisque l'objectif poursuivi ici est de diminuer les besoins énergétiques de l'habitation. Ce n'est qu'en isolant par l'extérieur que nous y parviendrons. Nous limiterons de cette manière les ponts thermiques (principalement au droit des planchers) et serons moins tenus quant à l'épaisseur d'isolant à mettre en œuvre. De plus, grâce à ses murs en pierre de plus de cinquante centimètres d'épaisseur, l'habitation possède une très grande inertie thermique dont nous ne pouvons nous permettre de ne pas tirer profit. Isoler une habitation de ce type par l'intérieur, lorsqu'on sait qu'elle a été conçue pour stocker et restituer l'énergie thermique, entraînerait sans aucun doute des problèmes de condensation. Malgré sa vétusté, il reste indéniable qu'il est dommage de perdre l'aspect esthétique de la pierre régionale, donnant son caractère à la bâtisse. Afin de limiter l'impact visuel de cette transformation, nous choisirons de revêtir l'enveloppe d'un crépi, matériau également beaucoup utilisé dans la région, que nous choisirons de couleur similaire à la pierre d'origine. Nous laisserons également la pierre d'une partie des murs intérieurs visible afin de préserver quelque peu son caractère originel.

3.3.1.2 LE CHOIX DE L'ISOLANT

Il existe aujourd'hui une multitude de produits sur le marché. Ils se déclinent sous différentes formes (panneaux, rouleaux, en vrac,...) et présentent des performances et des coûts variables. Ils peuvent être écologiques et se destinent à des usages variés selon leurs caractéristiques techniques.

Différentes familles sont rencontrées sur le marché. Les isolants synthétiques sont des matériaux produits par l'industrie chimique. Parmi ceux-ci, citons le polystyrène expansé, le polystyrène extrudé ou encore le polyuréthane. Les isolants minéraux sont à ce jour les plus couramment employés. D'origine naturelle, ils sont mélangés à d'autres matériaux pour être commercialisés. Les plus connus sont la laine de verre, la laine de roche et le verre cellulaire, mais la perlite, la vermiculite et l'argile expansée en font également partie. Les isolants d'origine végétale sont actuellement en pleine expansion. Ils valorisent les fibres végétales du chanvre, du liège, du lin, du coco, du coton et même du bois. Les isolants d'origine animale, la laine de mouton et les plumes de canard, font également l'objet d'une demande croissante. Parallèlement à ce marché se développent des produits dits de nouvelle génération, comme les aérogels et les panneaux sous vide notamment, qui en sont encore au stade expérimental (Gallauziaux & Fedullo, 2009).

Les possibilités ne manquent donc pas et le choix à effectuer est vaste. Une majorité de ces isolants ne répond pourtant pas aux critères que nous nous sommes fixés. Malgré le fait qu'elles soient encore majoritairement utilisées, la laine de verre et la laine de roche présentent des risques pour la santé par inhalation de microfibres lors de la pose. Dans une démarche d'isolation saine et respectueuse de l'environnement, les isolants issus de l'industrie pétrochimique (isolants synthétiques) seront également à exclure. De plus, nous avons montré qu'il n'est pas judicieux d'utiliser des matières ou matériaux étanches à la vapeur d'eau, totalement incompatibles avec le mode constructif d'une maison ancienne. Les isolants synthétiques et minéraux, ainsi que tous ceux comportant des additifs imperméabilisants (ciment, monocouches étanches,...) sont donc à proscrire.

Les isolants naturels, par contre, sont particulièrement adaptés à l'isolation des maisons anciennes car il s'agit de matériaux sains qui ne contredisent pas les qualités de respiration de l'habitation (Le Goarnig, 2008). C'est donc naturellement vers ces isolants dits écologiques que nous nous dirigerons. De nos jours, ils se déclinent en une variété de produits similaires aux isolants conventionnels. C'est donc un par un que doivent être évalués les avantages et inconvénients de chaque produit afin d'effectuer un choix judicieux.

Pour ce faire, le tableau comparatif de l'annexe 5 récapitule les principales caractéristiques thermiques, mécaniques et environnementales d'isolants écologiques. Ce tableau constituera la base de nos choix (cf. 3.3.2.2 *La réalisation de l'isolation*).

3.3.2 LES TRAVAUX D'ISOLATION

3.3.2.1 TRAVAUX PREALABLES

Les travaux d'isolation d'une maison ancienne doivent être abordés de manière radicalement différente d'une construction neuve car sa structure est souvent détériorée. Il faut dès lors intervenir en réparation avant d'envisager les travaux d'isolation afin que celle-ci puisse être mise en œuvre dans des conditions optimales. L'humidité dans les murs est, dans une maison ancienne, la principale cause de déperditions thermiques et de dégradation des structures. Ces problèmes doivent donc être résolus avant tout. Quoi qu'il en soit, les travaux de remise en état doivent toujours être réalisés avec des matériaux naturels ou des matériaux de substitution compatibles et sains (Le Goarnig, 2008).

LE DECREPISSEMENT DES SURFACES CIMENTEES

Le ciment, compact et dur, est un bon conducteur thermique et constitue de ce fait un mauvais isolant. Il s'agit également d'un matériau imperméable. Lorsque les murs d'une habitation ancienne sont enduits de ciment, l'effet de capillarité peut faire remonter dans la maçonnerie l'humidité prisonnière sous cette couche étanche. Cette humidité peut affecter plusieurs étages et attaquer le bois du plancher et de la charpente. Avant d'entreprendre des

travaux d'isolation, ce revêtement étanche doit donc être retiré afin de repartir sur des bases saines. S'il ne l'était pas, tout isolant mis en place, qu'il soit écologique ou non, n'aurait ni efficacité, ni durabilité (Le Goarnig, 2008).

Sur d'anciennes photos (cf. annexe 1, photo 6), nous observons que les murs de la maison ont été enduits par le passé. Nous ignorons les caractéristiques de cet enduit et il n'en reste aujourd'hui que quelques résidus (cf. annexe 1, photo 8). Il faudra néanmoins les ôter avant de commencer les travaux.

LES DRAINS PERIPHERIQUES

Dans un bâtiment ancien, les murs entrent généralement en contact direct avec le sol. Afin d'éviter qu'ils ne s'imprègnent de l'humidité de la terre, il est bon d'évacuer les eaux de ruissellement grâce à un système de drainage extérieur, réalisé sur toute la périphérie de la maison.

Pour ce faire, il faut creuser une tranchée au ras du mur extérieur, environ 50 centimètres sous le niveau du sol. Pendant les travaux de terrassement, il est ainsi également possible de vérifier si les fondations de la maison sont saines et ne nécessitent pas de reprise en sous-œuvre. Un enduit naturel de sable et de chaux, hydrofuge et respirant, est ensuite appliqué sur le mur jusqu'au fond de la tranchée en formant une rigole avec une pente régulière. Les qualités de cet enduit empêchent l'eau de le pénétrer et d'ainsi remonter par capillarité dans la maçonnerie, tout en permettant à la vapeur d'eau de s'évacuer du mur. Un drain rigide est ensuite placé au fond de la tranchée afin de récupérer les eaux de ruissellement. Ces dernières sont ensuite évacuées au moyen d'une fosse d'infiltration. La tranchée est finalement comblée jusqu'au niveau du sol par de gros graviers drainants. Elle ne doit pas être recouverte de terre et il faut éloigner toute végétation de 50 centimètres de la base des murs (Le Goarnig, 2008).

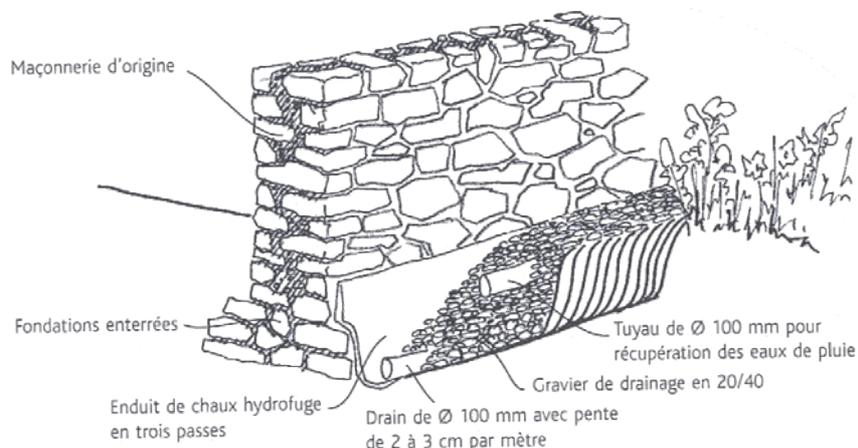


Figure 14: Principe du drainage périphérique (source : Le Goarnig, 2008)

LE HERISSON VENTILE

Le sol du rez-de-chaussée de la maison est constitué d'une épaisse couche de ciment directement posée sur un terre-plein. Dans le même ordre d'idée que pour le décrépiage des murs, cette dalle étanche fait obstacle à la vapeur d'eau qui doit s'évacuer pour ne pas imber le bas des fondations. Elle doit donc être supprimée, ce qui permettra de remettre à niveau tous les sols du rez-de-chaussée.

Une fois le sol intérieur de l'habitation décapé, il sera stabilisé à l'aide d'une faible épaisseur de poudre de chaux et de terre qui empêche les remontées capillaires et neutralise les activités animales (vers de terre, rongeurs). Nous poserons ensuite un drain souple de dix

centimètres de diamètre, perforé sur toute sa longueur, en serpentins espacés d'un mètre environ. Ses deux extrémités doivent déboucher à l'extérieur du bâtiment, sur des façades opposées, pour provoquer une bonne aération. Ces drains sont ensuite recouverts d'un hérisson de gros graviers lavés non poreux sur 15 à 40 centimètres d'épaisseur. De cette manière, le sol de la pièce n'est plus en contact direct avec la terre naturelle. Nous coulerons ensuite un béton de chaux de 8 à 10 centimètres d'épaisseur sur lequel sera posé l'isolant. Ce dernier sera ensuite recouvert d'une chape de finition de 8 centimètres avant de placer le revêtement final. Il est à noter que ce système est tout à fait compatible avec un chauffage par le sol (Le Goarnig, 2008).

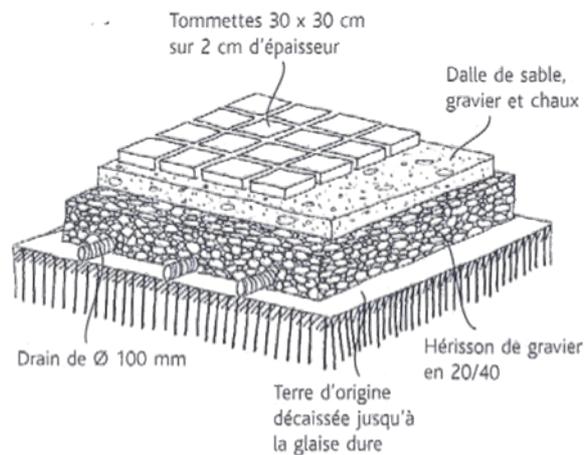


Figure 15: Principe du hérisson ventilé (source : Le Goarnig, 2008)

3.3.2.2 CHOIX ET REALISATION DE L'ISOLATION

LES MURS EXTERIEURS

Les murs de l'habitation sont constitués d'environ cinquante centimètres de moellons en pierre de la région. En observant le mur d'origine, celui-ci semble cependant relativement hétérogène. Ceci est probablement dû au fait que, lors de la construction, les propriétaires ont inclus toute une série d'autres matériaux qu'ils ont trouvés sur place. Il s'agit d'un mur en pierre avec remplissage tout-venant.

Nous avons fait le choix, pour les raisons citées précédemment d'une isolation par l'extérieur et d'un revêtement en crépi (cf. 3.3.1.1 *Les modes d'isolation*). L'isolant que nous choisirons doit donc posséder plusieurs caractéristiques techniques. Il doit avant tout être adapté à un usage extérieur, avoir une bonne résistance à l'humidité et un tassement vertical faible étant donné son usage. Afin de faciliter la mise en œuvre, il doit également pouvoir être directement enduit, et donc posséder une rigidité suffisante. Au vu de ces exigences, notre choix s'est porté sur un isolant en panneaux de fibres de bois, spécifiquement prévus pour le support d'enduit. Son épaisseur n'est cependant pas encore déterminée à ce stade. Elle le sera lors de l'étude de l'influence de l'épaisseur sur les besoins en chauffage grâce au programme Pleiades+Comfie (cf. 3.4 *L'implémentation dans Pleiades+Comfie*).

L'enduit qui sera ensuite appliqué sera multicouche. Il se compose d'une couche de gobetis (ou couche d'accrochage, projetée sur le support), de dégrossis (ou corps d'enduit destiné à uniformiser la surface en épaisseur) et d'une couche de finition pour l'aspect décoratif (Ruot, 2009). Dans un souci de cohérence avec les principes suivis jusqu'ici, il s'agira de produits naturels, à base d'un liant de chaux aérienne. Celui-ci convient tant pour le gobetis que pour le corps d'enduit.

La pose d'un isolant sous forme de panneaux ne peut cependant se faire directement sur le mur d'origine, ce dernier étant bien trop irrégulier. Avant la mise en œuvre de l'isolant et après décrépiçage du ciment, nous appliquerons donc une couche de mortier d'épaisseur variable sur le mur afin d'en égaliser la surface. Cela permettra d'appliquer aisément les panneaux isolants fixés mécaniquement.

LE SOL

Nous avons déjà abordé précédemment la composition du sol lors de la mise en place d'un hérisson ventilé.

Il nous faut néanmoins opter pour un isolant adapté à cette utilisation. Notre choix doit donc porter sur un produit relativement rigide, présentant des caractéristiques mécaniques élevées, notamment en matière de compression transversale. A nouveau, nous choisirons un isolant en panneaux de fibres de bois, d'une épaisseur de 6 centimètres. Cela permet d'obtenir un coefficient de transmission thermique $U = 0,391 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le revêtement final sera quant à lui constitué d'un carrelage en terre cuite, préservant le caractère sudiste de l'habitation tout en participant à son inertie.

LA TOITURE

Dans une habitation, le toit génère les plus grosses déperditions de chaleur. On les estime entre 30 à 40% des pertes thermiques totales d'une habitation. Une isolation performante de la toiture constitue donc un point essentiel si l'on désire faire d'importantes économies de chauffage (Le Goarnig, 2008). En été, l'isolant protégera l'espace intérieur de trop fortes chaleurs, participant ainsi au confort d'été de l'habitation. Dans le cadre de ce projet, l'isolation de la toiture est une étape complexe qui demande une étude un peu plus approfondie.

Dans un premier temps, notons qu'une grande partie de la toiture de la bâtisse est délabrée et doit être totalement remplacée (cf. annexe 1, photos 11 & 12). La structure de l'autre partie est quant à elle en bon état et peut ainsi être conservée (cf. annexe 1, photo 10).

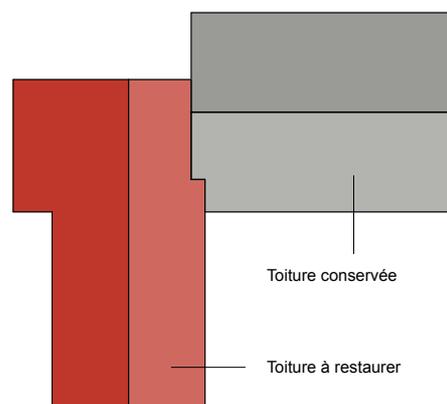


Figure 16 : Toiture à restaurer et toiture conservée (réalisation : Monaco, 2012)

Comme pour les murs, l'isolation de la toiture peut s'effectuer par l'intérieur ou par l'extérieur. L'isolation par l'intérieur est plus aisée et peut être effectuée à n'importe quelle période de l'année. Elle est aussi moins coûteuse mais entraîne une perte d'espace (Le Goarnig, 2008).

La toiture conservée présente néanmoins un inconvénient majeur. En effet, une isolation intérieure de la toiture combinée à une isolation par l'extérieur des murs provoque la naissance d'un pont thermique au sommet du mur.

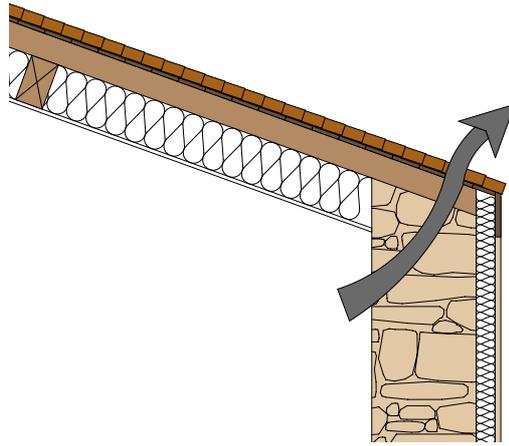


Figure 17: Pont thermique engendré à la jonction mur-toiture (réalisation: Monaco, 2012)

En outre, à cause de la surépaisseur engendrée par l'isolant extérieur des murs, la toiture devra subir d'importants travaux de prolongation. La partie de la toiture qui doit être entièrement remplacée engendrera quant à elle des travaux d'une telle ampleur qu'il sera plus avantageux de l'isoler par l'extérieur.

L'isolation par l'intérieur permettrait de conserver les génoises, corniches régionales typiques. En isolant par l'extérieur, celles-ci constitueraient par contre un pont thermique sur toute la périphérie de l'habitation. En observant d'un peu plus près, nous constatons néanmoins qu'une majeure partie des génoises ont déjà été remplacées par un système de récolte des eaux pluviales (cf. annexe 1, photo 9). En vérité, génoises et gouttières sont totalement incompatibles, les génoises ayant justement pour objectif d'éloigner le ruissèlement du mur. Or, dans le cas d'une habitation autonome, la récolte des eaux pluviales s'impose, comme nous le verrons par la suite. Nous devons donc faire fi des génoises et cet argument ne peut véritablement entrer en ligne de compte dans notre choix.

En conclusion, nous préférons finalement, pour les deux toitures, l'isolation par l'extérieur aux moyens de caissons. Nous détaillerons un peu plus loin comment traiter les ponts thermiques précédemment évoqués.

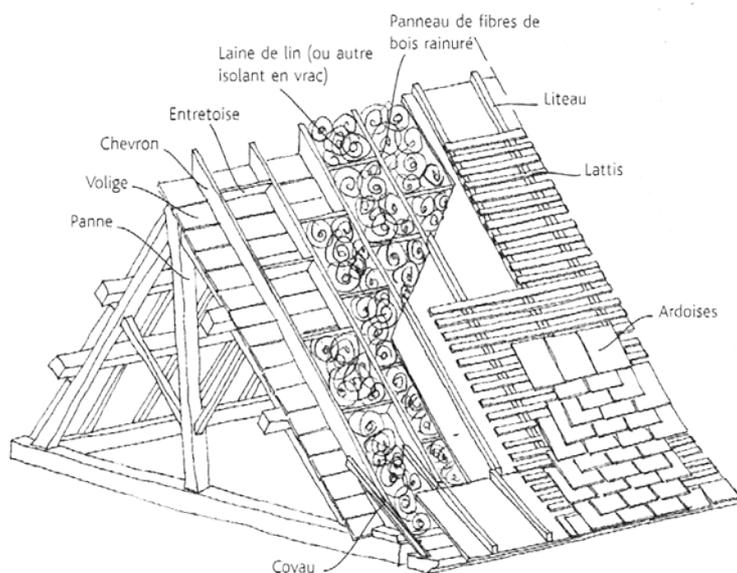


Figure 18: Isolation d'une toiture par caissons extérieurs remplis d'isolant (source : Le Goarnig, 2008)

Les éléments de toiture qui peuvent être conservés sont les pannes, les chevrons et les voliges qui les recouvrent. Nous viendrons ensuite créer des caissons par dessus. Ces caissons, d'une hauteur d'environ 15 centimètres, seront remplis d'isolant. Le produit sur lequel s'est porté notre choix est constitué de laine de chanvre. Grâce à cela, nous atteignons un coefficient de transmission thermique $U = 0,131 \text{ W/m}^2\text{K}$. D'un point de vue écologique, ce matériau présente des avantages indéniables avec une énergie grise particulièrement faible. Il convient à un usage extérieur et possède les caractéristiques mécaniques adaptées à sa mise en œuvre.

Les caissons seront ensuite recouverts de panneaux en fibres de bois. Ceux-ci possèdent des caractéristiques telles qu'ils remplissent la fonction de pare-pluie et leurs performances thermiques permettent de renforcer l'isolation au droit des éléments en bois constituant les caissons. Le contrelattage et le lattage permettront finalement de fixer les tuiles en terre cuite.

LES BAIES

Les baies constituent également une composante importante des pertes thermiques d'une habitation. Dans notre cas, nous avons conclu qu'aucune baie ne pouvait être conservée. Trop abimées ou trop petites, en surface et en nombre, elles n'offraient pas le confort nécessaire aux habitants. Nous disposons donc d'une grande liberté dans le choix des nouveaux châssis.

Dans une démarche écologique, il semble naturel de privilégier le bois par rapport à l'aluminium et au PVC. Il s'agit d'un matériau naturel présentant des caractéristiques thermiques intéressantes (Le Goarnig, 2008). En optant pour le bois, nous privilégions également le caractère ancestral de la bâtisse. Il est préférable de choisir des bois locaux avec des huisseries épaisses (6 à 8 centimètres) afin d'assurer une meilleure isolation.

Il existe aujourd'hui une multitude de vitrages différents. Les doubles vitrages classiques sont peu à peu remplacés par les doubles vitrages peu émissifs, mais on trouve également sur le marché du triple vitrage. Ce dernier est nettement plus performant en matière d'isolation mais reste néanmoins très coûteux (Le Goarnig, 2008). Le tableau suivant compare les performances des simple, double et triple vitrages.

Type de vitrage	Epaisseur vitrage – lame d'air – vitrage	Coefficient de transmission thermique U ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Simple	4	5,7
Double classique	4 – 6 – 4	3,4
Double peu émissif	4 – 14 – 4	1,8
Triple	4 – 12 – 4 – 12 – 4	0,6 à 0,8

Tableau 2: Comparaison des performances des simple, double et triple vitrages (réalisation : Monaco ; source : Le Goarnig, 2008)

Dans le cadre de ce projet, le choix d'un double vitrage peu émissif constitue un bon compromis entre le rôle isolant que doit jouer ce vitrage, son rôle bioclimatique en hiver et son prix.

3.3.3 LES PONTS THERMIQUES

3.3.3.1 ENJEUX

Une construction comporte toujours des points délicats où l'isolation présente des faiblesses ou même s'avère inexistante. Ces points faibles, appelés ponts thermiques linéaires, se situent généralement au niveau des jonctions entre éléments porteurs (plancher-mur, mur-toiture, balcon,...). Il existe également un autre type de ponts thermiques, dits ponctuels,

généralement créés au droit d'éléments de fixation (de l'isolant par exemple) ou d'éléments structurels ponctuels (poutrelle métallique ou en béton,...).

Ces ponts thermiques ont deux conséquences majeures sur l'habitat. Ils sont une source de perte de chaleur, proportionnelle au niveau d'isolation de l'habitation, et peuvent engendrer des problèmes de condensation (apparition de moisissures, champignons,...).

Il existe dans la réglementation des valeurs seuils admissibles pour les ponts thermiques. Trois règles générales permettent d'annuler ou de réduire ces défauts d'isolation. La première consiste à placer un élément de rupture isolant au droit du passage du flux thermique. On peut également veiller à réduire la section de passage de la chaleur en utilisant par exemple des éléments ponctuels plutôt que linéaires. Enfin, lorsqu'un pont thermique ne peut être évité, il est toujours possible de chercher à allonger son parcours grâce à un retour d'isolant (Gallauziaux & Fedullo, 2009).

En rénovation énergétique, il est indispensable de prêter une attention toute particulière au risque d'éventuels ponts thermiques et, le cas échéant, à leur résolution. Le choix d'une isolation par l'extérieur permet de limiter ces risques mais ne peut les annihiler totalement. Les jonctions des murs avec la toiture et le plancher sur terre-plein restent des points délicats qu'il faut traiter.

3.3.3.2 RESOLUTION DES PONTS THERMIQUES

JONCTION MUR-TOITURE

Lors des travaux d'isolation et suite aux choix adoptés, les murs extérieurs et la toiture de l'habitation ont vu leur composition et leur épaisseur modifiées. La jonction entre ces deux éléments a donc dû être repensée afin d'assurer la continuité de l'isolant.

Le choix d'une isolation par l'extérieur, tant pour la toiture que pour les murs, n'est pas anodin. Il facilite grandement la résolution d'un pont thermique potentiel qui aurait de graves conséquences sur les performances thermiques de l'habitation. Une discontinuité de l'isolant ne peut cependant être évitée en tête de mur, où des éléments ponctuels devront être fixés aux chevrons afin de soutenir la gouttière. Ci-dessous se trouve le détail de la jonction mur-toiture.

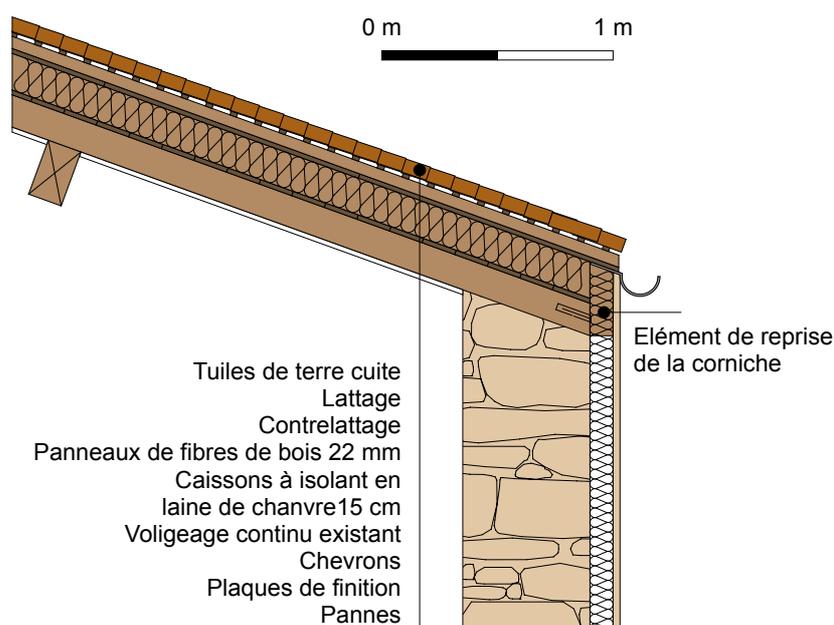


Figure 19: Jonction mur-toiture (réalisation : Monaco, 2012)

JONCTION MUR-SOL

Quoi que nous fassions, nous ne pouvons en aucun cas éviter une faiblesse de l'isolation thermique en cet endroit. Les épais fondations sont solidement ancrées dans le sol et la continuité de l'isolant ne peut être assurée. Dès lors, il faut veiller à limiter l'impact de ce pont thermique. Etant donné la géométrie de l'habitation, le meilleur moyen est d'augmenter au maximum le chemin du flux de chaleur. En creusant autour de l'habitation pour la mise en œuvre du système de drainage, il conviendra de placer une épaisseur d'isolant en pied de mur. Il ne peut s'agir d'un isolant naturel, sensible à l'humidité. Nous mettrons donc en place un produit en mousse de verre.

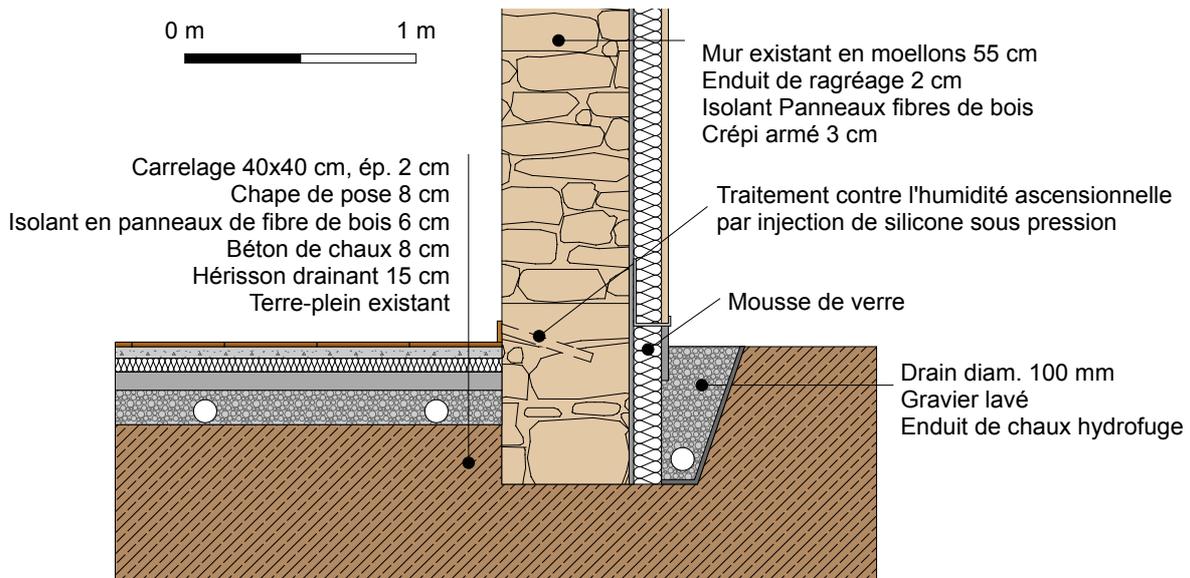


Figure 20: jonction mur-sol (réalisation : Monaco, 2012)

JONCTION PIGNON-TOITURE

Les risques de pont thermique peuvent également être induits par la géométrie même du bâtiment. Il existe parfois des nœuds un peu particuliers qui méritent notre attention. Le bâtiment que nous étudions se compose de deux volumes qui s'articulent perpendiculairement entre eux. Leur jonction a été réfléchi afin d'éviter tout pont thermique.

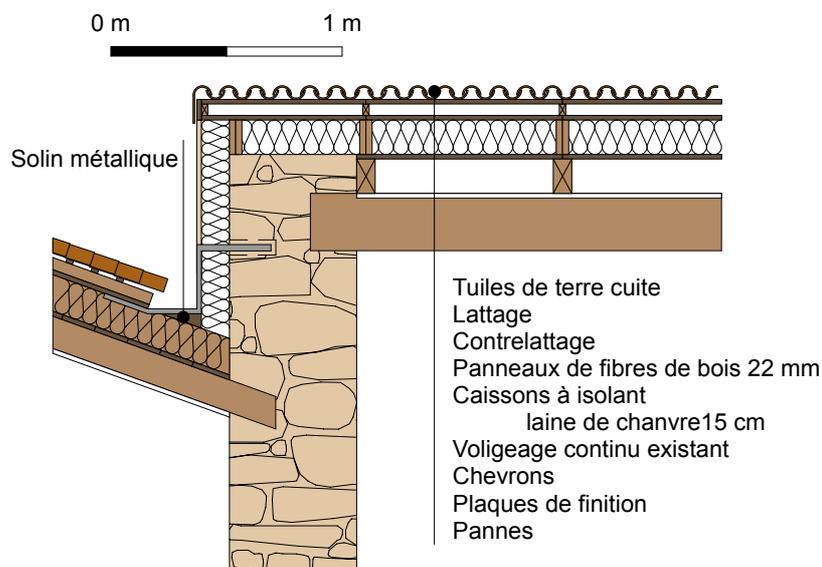


Figure 21: jonction pignon-toiture (réalisation : Monaco, 2012)

3.4 L'IMPLEMENTATION DANS PLEIADES+COMFIE

Pleiades+Comfie est un logiciel de simulation thermique dynamique multizone développé par la société Izuba Energies. Pleiades est l'interface de saisie et Comfie le noyau de calcul. Ce programme permet l'analyse du comportement thermique d'un bâtiment. Il prend en compte des paramètres tels que l'inertie thermique, les apports solaires passifs et les scénarii d'utilisation du bâtiment. Il est alors possible d'en optimiser l'enveloppe, de connaître l'évolution de la température heure par heure dans chaque zone, ainsi que les besoins en chauffage et en rafraîchissement et leur puissance.

L'objectif poursuivi en utilisant ce programme est double. D'une part, il permettra d'optimiser l'enveloppe en étudiant l'influence de l'isolation thermique des murs sur les besoins en chauffage de la bâtisse. D'autre part, nous allons évaluer l'impact du mode de ventilation (naturelle ou mécanique), une fois la composition de l'enveloppe fixée, sur ces mêmes besoins en chauffage. Grâce à ces résultats, nous pourrons nous faire une première idée des équipements à prévoir ainsi que de leur puissance (et par là, l'électricité qu'ils vont consommer) pour assurer le bon fonctionnement du bâtiment.

3.4.1 LA BIBLIOTHEQUE

La bibliothèque se divise en différentes parties.

Dans un premier temps, elle permet de déterminer la composition des différentes parois intérieures et extérieures qui constituent les zones thermiques du projet. A partir de matériaux (dont l'épaisseur doit être déterminée) et d'éléments (dont l'épaisseur est prédéfinie, pour les éléments préfabriqués par exemple), il est possible d'implémenter une composition de paroi. Le programme permet également, pour les structures mixtes, d'implémenter une composition multiple en entrant le pourcentage occupé par chaque composition. La composition des différentes parois du bâtiment est fournie à l'annexe 6.

Il est également possible de tenir compte des menuiseries et ponts thermiques. Lorsque ces derniers ne sont pas encodés manuellement, le programme affecte un coefficient linéique ψ égal à 0,7 W/m.K sur toute la longueur des parois verticales. Il est assez compliqué de quantifier avec précision l'ensemble des ponts thermiques d'une habitation. C'est pourquoi nous avons adopté ce coefficient par défaut.

Finalement, il reste à implémenter les scénarii d'utilisation du bâtiment. Un scénario de puissance dissipée se calquant sur les valeurs de la RT2012 a été créé. Il tient compte de la puissance dissipée par l'éclairage (2 W/m²) et par les équipements et l'occupation (5 W/m²). Nous nous sommes basés sur ces valeurs, auxquelles nous avons retiré la composante liée à l'occupation puisque celle-ci fait l'objet d'un scénario qui lui est propre. Nous obtenons finalement un scénario de puissances dissipées de 5 W/m². Le scénario d'occupation tient compte du fait qu'en matinée, en soirée et le week-end, l'ensemble des occupants se trouvent dans la pièce de vie alors qu'ils se répartissent entre les différentes chambres durant la nuit. Les autres pièces sont des lieux de passage et ne sont pas véritablement considérées comme occupées. Un scénario d'occultation doit également être élaboré pour tenir compte des protections solaires des baies. Ensuite, un scénario contenant les consignes de température permet d'indiquer à partir de quelle température intérieure le chauffage se mettra en route. Selon la RT2012, celle-ci est fixée à 19°C et se répartit sur une période allant du 28 octobre au 16 avril. Puisqu'il n'est pas prévu d'installer de dispositif de climatisation, aucun scénario ne sera affecté pour l'été. Finalement, un scénario de ventilation renseigne les tranches horaires durant lesquelles l'air sera renouvelé. Les débits sont quant à eux fixés selon l'Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements.

Une fois ces scénarii élaborés sur l'ensemble de la semaine, ils doivent être déterminés pour toute l'année, en différenciant si nécessaire les mois d'été de ceux d'hiver.

3.4.2 LE BATIMENT

Cette partie du programme permet de modéliser les caractéristiques de chaque zone thermique. Pour commencer, il convient d'encoder dans le programme chaque paroi constituant les zones thermiques. Les parois en contact doivent ensuite être couplées. Chaque paroi est définie via plusieurs paramètres. Il faut implémenter ses dimensions, son orientation et son inclinaison, ainsi que sa composition, déterminée au point précédent. Il est également possible de tenir compte de son environnement en rentrant un albédo, les éventuelles occultations de la paroi (par exemple la végétation) et son exposition au vent. Les ouvertures sont finalement ajoutées. Pour celles-ci, des masques peuvent être définis.

Finalement, cette partie permet de tenir compte d'un éventuel environnement construit autour du bâtiment. Comme l'habitation étudiée se situe en site dégagé, nous n'avons pas tenu compte de ce paramètre.

3.4.3 STD COMFIE

Cette étape est la dernière avant la simulation.

Des fichiers météo prédéfinis permettent de tenir compte du climat dans lequel se trouve l'habitation. Selon la RT2012, le département de la Drôme se trouve en zone H2D pour lequel la référence choisie est la ville de Carpentras. Il est ensuite possible d'affiner les valeurs du fichier météo en encodant l'altitude du lieu, de 275 mètres dans notre cas.

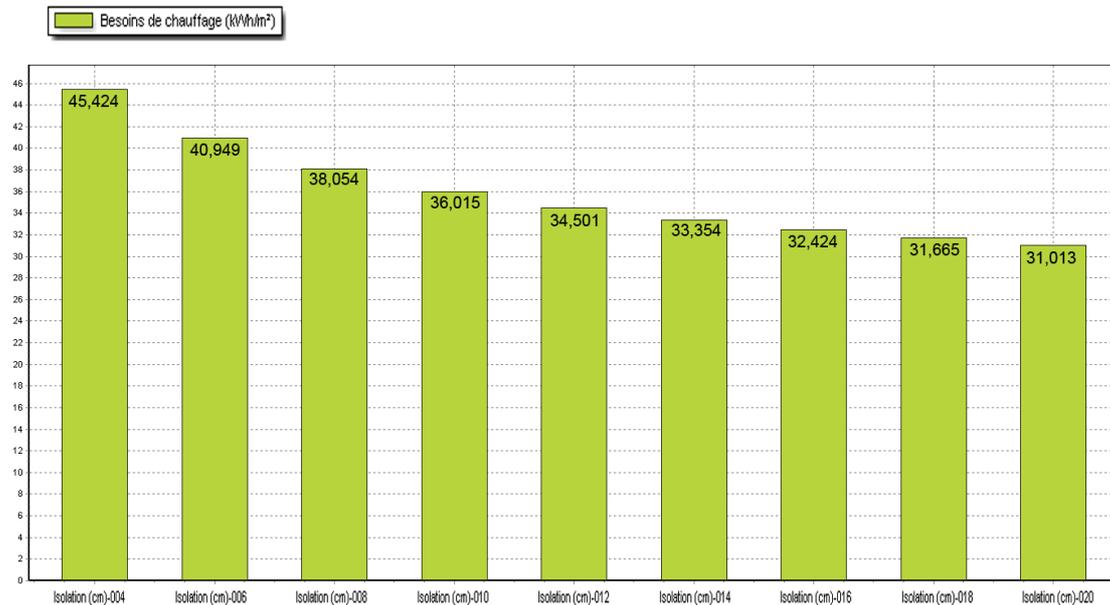
L'onglet « Fonctionnement » permet d'affecter à chaque zone thermique les scénarii annuels qui ont été définis dans la bibliothèque. Si le scénario de ventilation a été déterminé précédemment, le type de ventilation doit être fixé ici. Nous choisirons comme cas de base un bâtiment ventilé naturellement. Cependant, il n'est pas possible d'implémenter directement une ventilation naturelle. Celle-ci varie en fonction de nombreux paramètres tels que la géométrie du site d'implantation, la température extérieure, la taille et l'orientation des baies,... Tous ces calculs seraient extrêmement coûteux pour le programme et nous nous voyons obligés de simplifier les échanges. Nous avons donc choisi d'implémenter une ventilation mécanique forcée dont les débits de renouvellement d'air correspondent aux normes fixées en la matière, en ne considérant pas d'échangeur de chaleur afin que l'air entrant ait la température de l'air extérieur. Il est à noter que seuls les débits entrants doivent être fournis, le programme considère automatiquement que ce qui entre dans le bâtiment en sortira.

3.4.4 SIMULATION

Une fois tous ces paramètres encodés, la simulation peut enfin être lancée. Il est possible de définir le pas de temps ainsi que la période de simulation. Pour une analyse des besoins en chauffage, un pas de temps de 30 minutes est recommandé. Il est également possible, et c'est particulièrement intéressant pour optimiser l'enveloppe, de créer une variation paramétrique de certains composants. Cela permet d'évaluer rapidement l'influence de l'épaisseur d'isolant sur les performances thermiques. Finalement, il est à noter que des diagrammes peuvent être créés à partir de chaque paramètre évalué, facilitant la lecture de chaque résultat.

3.4.4.1 SIMULATION 1 : OPTIMISATION DE L'ENVELOPPE

Lors de cette simulation, nous avons fait varier l'épaisseur d'isolant des murs extérieurs de 4 à 20 centimètres. Le diagramme suivant montre l'influence de l'épaisseur d'isolant sur les besoins en chauffage du bâtiment, exprimés en kWh/m².an.



Graphique 4: Evaluation de l'influence de l'épaisseur d'isolant sur les besoins en chauffage (source : Pleiades+Comfie, 2012)

Nous observons que les premiers centimètres d'isolant influencent fortement les besoins en chauffage. En passant de 4 à 6 centimètres, la différence est de pratiquement 5 kWh/m².an ! Jusqu'à une épaisseur de 12 centimètres, une augmentation d'épaisseur de 2 centimètres induit une diminution des besoins en chauffage d'environ 2 kWh/m².an. Au-delà de 14 centimètres, l'influence de l'isolation devient moindre, avec une variation de moins d'1 kWh/m².an.

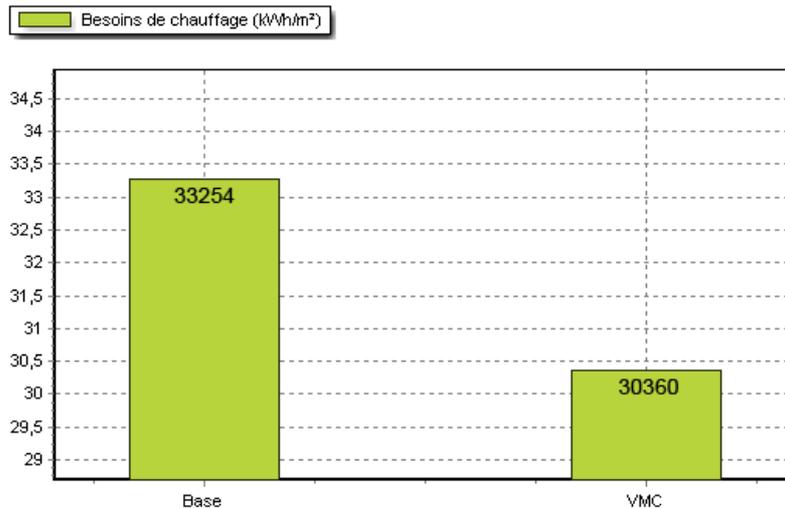
A la vue de l'histogramme ci-dessus, nous optons finalement pour une isolation des murs extérieurs de 14 centimètres de panneaux en fibre de bois. Ce choix paraît le plus pertinent compte tenu de paramètres tels que le rapport entre investissement de départ et bénéfice sur la consommation en chauffage. Dans cette configuration, les besoins en chauffage du bâtiment s'élèvent à 33,354 kWh/m².an (que nous arrondirons à 33 kWh/m².an) et la puissance du corps de chauffe nécessaire est de 8065 W. Le coefficient de transmission thermique s'élève quant à lui à 0,245 W/m².K.

Le calcul simplifié du niveau d'isolation thermique globale (cf. annexe 7) montre que, dans ces conditions, l'habitation possède un niveau K29.

3.4.4.2 SIMULATION 2 : IMPACT D'UNE VENTILATION MECANIQUE FORCEE

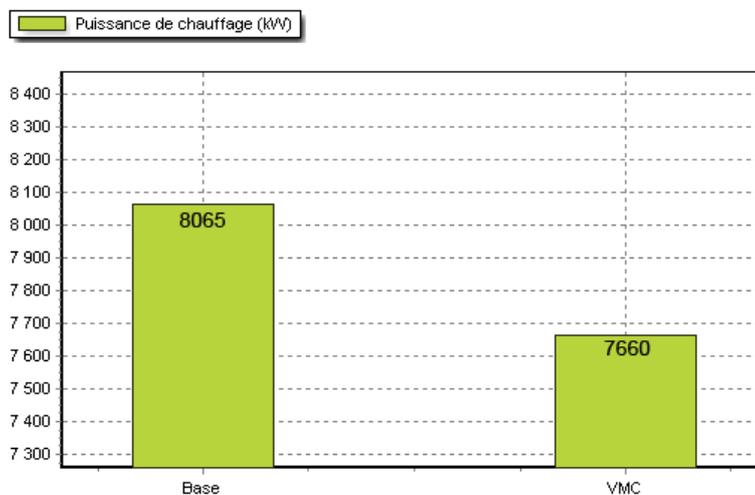
Une fois l'épaisseur d'isolant fixée, il est intéressant d'évaluer l'impact du mode de ventilation du bâtiment sur les résultats obtenus en matière de chauffage.

Le cas de référence est le cas cité précédemment : ventilé naturellement, avec 14 centimètres d'isolant et des besoins annuels en chauffage de 33 kWh/m².an. Nous allons maintenant le comparer au cas d'un bâtiment ventilé au moyen d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) munie d'un échangeur de chaleur d'une efficacité de 95%. Le diagramme suivant montre l'influence de la VMC sur les besoins en chauffage.



Graphique 5: Influence du mode de ventilation sur les besoins annuels en chauffage (source : Pleiades+Comfie, 2012)

Nous constatons que les besoins en chauffage d'une habitation ventilée mécaniquement sont moindres de 3 kWh/m².an. Ce bénéfice reviendrait, en terme d'isolation, à une épaisseur d'environ 24 centimètres, ce qui n'est pas concrètement réalisable. Préchauffer l'air entrant a donc un effet relativement bénéfique sur les besoins en chauffage. Ces effets se font automatiquement ressentir sur la puissance du corps de chauffe, qui devra développer moins d'énergie pour maintenir à la température désirée une pièce dont l'air neuf est déjà préchauffé.



Graphique 6: Comparaison du mode de ventilation sur la puissance de chauffage (source : Pleiades+Comfie, 2012)

Le choix final de l'emploi ou non d'une VMC s'effectuera dans le chapitre traitant de la problématique de l'électricité. En effet, outre l'impact sur la consommation en chauffage, d'autres paramètres entrent en compte et le choix du mode de ventilation doit se faire en parallèle avec les autres équipements de l'habitation, comme le mode de chauffage, afin d'en garantir le bon fonctionnement.

3.5 SYNTHÈSE

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'ensemble des étapes de la réhabilitation de l'habitation.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la conception architecturale afin de créer un projet respectueux du bâti existant et qui corresponde au mode de vie de ses habitants. Conjointement, les principes bioclimatiques y ont été mis en œuvre afin de bénéficier de l'énergie gratuite de l'environnement. Nous verrons dans la suite du travail l'importance de cette étape.

Nous avons ensuite porté notre attention sur la réalisation des travaux. De nombreuses mesures ont dû être prises afin d'assainir le bâtiment et de le rendre ainsi habitable. Les méthodes de réalisation et le choix des matériaux se sont faits dans un respect total du mode constructif ancestral tout en respectant nos objectifs en matière d'énergie et d'environnement.

Enfin, la simulation dans le programme Pleiades+Comfie nous a permis d'optimiser l'enveloppe et d'étudier l'influence de certains paramètres sur les performances du bâtiment. La composition finale de l'enveloppe est résumée sur le schéma suivant.

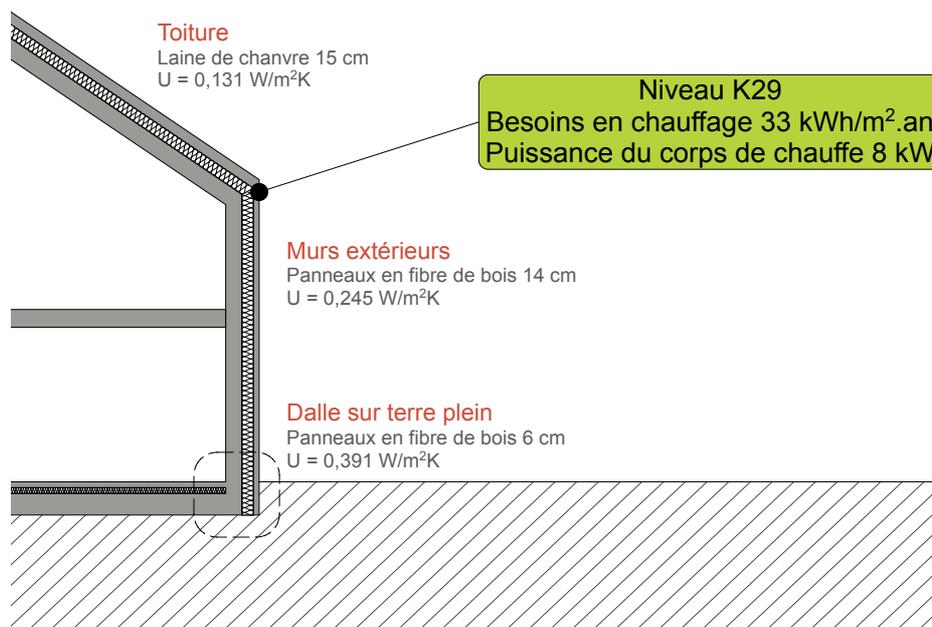


Figure 22: Récapitulatif du niveau d'isolation de l'enveloppe (réalisation : Monaco, 2012)

Toutes ces étapes nous ont permis de fixer une situation afin que la suite du travail puisse être réalisée dans les meilleures conditions. Nous connaissons désormais les principaux éléments, du projet architectural aux performances thermiques, qui vont guider nos choix et permettre l'élaboration d'un projet totalement autonome.

CHAPITRE 4

PROBLEMATIQUE DE L'EAU

4 PROBLEMATIQUE DE L'EAU

4.1 INTRODUCTION

4.1.1 OBJECTIFS

L'objectif de cette section est d'élaborer une stratégie complète de l'eau, permettant aux habitants de la maison de subvenir à l'ensemble de leurs besoins sans bénéficier d'un raccord au réseau public d'alimentation en eau potable ni au réseau d'assainissement collectif. La démarche adoptée entend s'insérer dans une démarche durable en proposant une gestion responsable des eaux dans leurs états successifs. Néanmoins, seuls les systèmes à l'échelle domestique seront envisagés, les procédés industriels à grande échelle ne pouvant répondre à nos attentes.

Dans un souci de clarté, nous aborderons cette section en suivant les états successifs qu'adoptera l'eau. Nous traiterons tout d'abord de l'eau pluviale et de sa récolte, puis du traitement à lui appliquer afin qu'elle puisse être valorisée pour les besoins de l'habitation. Nous terminerons en abordant le traitement des eaux usées rejetées par le ménage avant leur réinsertion dans le milieu naturel.

Au-delà du respect des objectifs précédemment fixés tels que la prise en considération des aspects environnementaux et la volonté de réduire autant que possible les besoins dans un souci d'autonomie, l'ensemble des dispositions législatives sera pris en compte. Nous veillerons également tout particulièrement à proposer des solutions peu énergivores afin de limiter l'impact sur la consommation électrique du ménage, qui sera abordée dans la suite de ce travail.

Ces objectifs permettront d'élaborer une stratégie de l'eau réaliste et adaptée à la logique d'une habitation auto-suffisante.

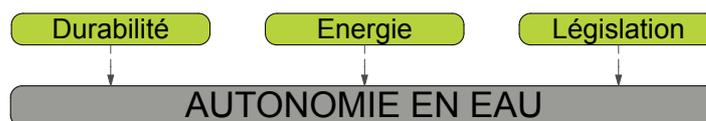


Figure 23: Objectifs pour l'autonomie en eau (réalisation : Monaco, 2012)

4.1.2 CONTEXTE ET ENJEUX

En 2010, sur 6 milliards d'individus dans le monde, on estimait que près de 1,6 milliards de personnes n'avaient pas accès à l'eau potable et que plus de 2,6 milliards étaient privées d'assainissement collectif. En France, ce sont 14 millions de français, soit 5 millions de foyers, qui ne sont à ce jour pas raccordés à un réseau public d'assainissement des eaux usées. Parmi ceux-ci, 600 000 foyers déversent leurs eaux usées dans la nature sans même un traitement préalable (Cabrit-Leclerc, 2010). Rien que sur la commune de Grâne, 307 foyers, à savoir 51% des habitations, disposent d'un assainissement autonome, dont plus de la moitié ne sont pas conformes ! (Conseil Général de la Drôme, 2006).

Si la surface de la Terre est occupée à 70% par l'eau, seul 1% est de l'eau douce. Au final, ce n'est que 0,3% de l'eau présente sur notre planète qui est directement utilisable pour

l'homme. Cette eau se répartit en eau de précipitation, en eau de surface (rivières, lacs, plans d'eau) et en eau souterraine (aquifères et roches réservoirs) (Vu, 2006).

En France, on estime que 50 à 75% des masses d'eau seraient dégradées. Des efforts tardifs et insuffisants en matière de gestion durable des eaux en sont responsables. La France accuse en effet un retard dans ce domaine. Par exemple, les textes règlementaires concernant l'assainissement autonome imposent le plus souvent une obligation de moyen sans obligation de résultat, contrairement aux assainissements collectifs. Or, les foyers non raccordés à l'assainissement collectif rejettent leurs eaux dans la nature, contribuant ainsi à la pollution des ressources en eau (Cabrit-Leclerc, 2010).

4.2 RECOLTE ET TRAITEMENT DES EAUX DE PLUIE

La recherche d'autonomie en eau pose la question inévitable de l'approvisionnement en eau. Plusieurs sources peuvent être envisagées : un lac, une rivière, un puits ou encore l'eau de pluie. Si toutes les habitations ne se trouvent pas à proximité d'une masse d'eau, les précipitations, elles, se répartissent sur l'ensemble du globe terrestre. Inégalement, certes, mais dans ce domaine la France n'est pas lésée. Avec des précipitations variant de 300 à 1800 mm/m².an selon la région (Deltau, 2004), il semble évident de privilégier la récolte des eaux de pluie.

4.2.1 QUALITE DE L'EAU DE PLUIE

Selon Joseph Orszagh (2012), ancien chercheur à l'Université de Mons-Hainaut et spécialiste dans le domaine de l'eau, c'est au moment où l'eau tombe du ciel qu'elle est la plus propre. De ce fait, il est important, pour disposer d'une eau de qualité dans l'habitation, de limiter autant que possible le contact avec des matières qui vont la charger en polluants. Pourtant, entre le moment où l'eau tombe du ciel et celui où elle pénètre dans un réservoir, il semble inévitable qu'elle se charge de substances indésirables. Malgré cela, l'eau de pluie reste l'une des eaux de surface les plus pures.

De manière générale, cette eau dispose d'un atout majeur pour son utilisation domestique à savoir qu'elle est pratiquement totalement exempte de calcaire. Il s'agit d'une eau douce et agréable pour l'hygiène corporelle, sous réserve d'un traitement adéquat, et réduit l'utilisation de détergents de 30 à 60%, ayant ainsi un impact favorable sur la charge polluante des eaux usées et sur la durée de vie des équipements. Par contre, l'absence de sels minéraux rend cette eau sans goût.

L'une des caractéristiques principales de l'eau de pluie est son acidité. Cette acidité est due à la présence de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Il s'agit donc d'une acidité naturelle, totalement inévitable. Cependant, l'oxyde d'azote et le dioxyde de soufre rejetés dans l'atmosphère par la combustion des carburants fossiles (pétrole, charbon,...) sont susceptibles d'entraîner un surcroît d'acidité de l'eau de pluie, avec tous les effets néfastes qu'on lui connaît (détérioration des forêts de conifères, des monuments en pierre calcaire,...). En effet, en entrant en contact avec un milieu aqueux, l'oxyde d'azote va se transformer en acide nitreux et en acide nitrique tandis que le dioxyde de soufre produira de l'acide sulfureux. Néanmoins, nous verrons que, pour la valorisation domestique, cette acidité est un avantage car elle permet de pallier à l'absence de sels minéraux.

En outre, des traces de pesticides, employés dans le milieu agricole et en partie évaporés dans l'air, sont susceptibles de se retrouver dans l'eau pluviale. Ceux-ci ont bien sûr un effet néfaste sur la santé et doivent être retirés de l'eau avant toute consommation.

De plus, des risques de pollution organique et minérale existent via le contact avec des feuilles mortes, cadavres d'animaux, fientes d'oiseaux, poussières et impuretés. C'est principalement au moment où l'eau ruisselle sur la toiture qu'elle se charge de ces polluants, mais aussi lors du stockage dans la citerne, si un rongeur ou une grenouille s'y est noyé par exemple.

Les matériaux employés pour la récolte des eaux de pluie, qu'il s'agisse de la toiture, des gouttières et chenaux ou de la citerne, ont également une importance capitale sur sa qualité. Les bardeaux de bois, par exemple, confèrent à l'eau une coloration jaunâtre due à la présence d'huiles essentielles libérées par le bois. Les toits en bitume sont susceptibles de libérer des hydrocarbures dont certains sont toxiques et confèrent, au même titre que le goudron ou certaines substances plastiques, un goût et une odeur désagréables à l'eau. De même, un contact prolongé avec certains métaux lourds, comme le plomb, le zinc ou le cuivre, peut entraîner la mise en solution de substances toxiques. Exception faite du plomb, cela n'empêche pas l'utilisation non-alimentaire de l'eau et n'empêchera jamais, avec un système d'épuration adapté, sa consommation à des fins alimentaires.

Il arrive enfin, dans certaines régions proches des côtes maritimes, que l'eau de pluie soit chargée en sels marins portés par des vents venant du large. A nouveau, un système d'épuration adapté permettra de rendre cette eau propre à la consommation.

En conclusion, nous remarquons que, si l'eau de pluie présente certaines caractéristiques constantes, de nombreux facteurs sont susceptibles de modifier sa composition. De plus, la durée d'exposition à ces polluants joue un rôle essentiel. Le fait qu'une toiture soit en zinc entrainera par exemple des conséquences moindres sur la qualité de l'eau que des corniches en cuivre, parce que l'eau ne fait que ruisseler sur la toiture tandis qu'elle peut stagner dans les corniches. Les conditions de conservation dans la citerne seront également susceptibles d'influencer la qualité de cette eau. L'eau ne présentera pas non plus les mêmes caractéristiques selon l'intensité des pluies et le temps de sécheresse entre deux averses (Abdulla & Al-Shareef, 2008). Le tableau suivant reprend les caractéristiques majeures de l'eau de pluie ainsi que ses principaux polluants.

Caractéristiques	Composition de l'eau de pluie	Remarques
Acidité	Oui	pH ≈ 6,3
Calcaire	Non	Moins de détergents
Présence de sels minéraux	Non	Absence de goût
Polluants		
Atmosphériques		
Pesticides	Toujours	Teneur variable
Gaz d'échappement	Toujours	Teneur variable
Sels marins	Rarement	Région côtière
Organiques		
Feuilles	Souvent	Dépend de l'environnement
Fientes d'oiseaux	Souvent	
Animaux morts	Souvent	
Minéraux		
Poussières, saletés	Souvent	
Métaux lourds		
Plomb, Cuivre, Zinc	Rarement	Dépend du temps de contact

Tableau 3: Récapitulatif des caractéristiques et polluants de l'eau de pluie (réalisation : Monaco ; source : Országh, 2012)

Il est donc relativement difficile de connaître avec exactitude la composition de l'eau de pluie récoltée par un ménage. S'il existe un risque de pollution spécifique, il est opportun de réaliser des tests en laboratoire afin de pouvoir élaborer par la suite une stratégie de traitement adaptée. Dans le cas qui nous occupe, il conviendra de prendre garde à l'utilisation de plomb pour l'étanchéité du velux et des panneaux solaires. De plus, les matériaux des corniches et gouttières devront être choisis avec soin. Grâce à ces préventions, nous pouvons exclure le risque que l'eau contienne des métaux lourds. De même, une teneur en sels marins paraît peu probable étant donné la situation géographique de l'endroit.

4.2.2 RECOLTE DE L'EAU DE PLUIE : PROCESSUS ET MATERIAUX

4.2.2.1 LA TOITURE, LES CORNICHES ET LES GOUTTIÈRES, LES FILTRES

Comme nous l'avons vu, les matériaux employés, notamment le revêtement de la toiture, les corniches et gouttières, influencent non seulement la qualité mais également la quantité d'eau de pluie récoltée.

LA TOITURE

Pour la toiture, il conviendra donc de privilégier, lorsque le choix sera possible, des matériaux chimiquement inertes avec l'eau tels que les tuiles de terre cuite ou en béton, l'ardoise naturelle, l'acier inoxydable ou encore le verre. On peut également tolérer l'emploi d'ardoises artificielles ou de tôles ondulées en fer galvanisé ou en plastique. Les toitures en zinc semblent ne pas avoir un impact néfaste sur l'eau car le contact n'est pas suffisamment prolongé. Il faudra par contre proscrire les bitumes et goudrons et les métaux lourds dont nous avons parlé tels que le plomb et le cuivre mais aussi l'aluminium. Le bois ne convient pas non plus à cause des huiles essentielles qu'il libère dans l'eau, lui procurant une forte coloration et un goût désagréable. De plus, les particules organiques libérées par le bois constituent un réel nid à microbes (Orszàgh, 2012).

Plus le matériau de revêtement sera lisse et propre, moins il y aura de pertes. En ce sens, les toitures végétales sont fortement déconseillées lorsqu'on souhaite récolter les eaux de pluies. Non seulement l'eau percole très lentement au sein du substrat en favorisant les pertes par évaporation, mais en plus cette eau se charge en matières solides en suspension entraînant un risque accru de pollution et une turbidité⁵ élevée.

La couleur des matériaux est également susceptible de jouer un rôle dans les pertes par évaporation, puisque nous savons qu'une toiture de couleur foncée s'échauffera bien plus qu'une toiture de couleur claire.

Le tableau suivant reprend le taux de pertes associé aux différents types de toitures ainsi que les effets indésirables des matériaux.

⁵ Caractère plus ou moins trouble d'un liquide (source: larousse.fr, 2012)

Type de toiture	Taux de perte (%)	Risques
Toiture plate		
Graviers	40%	-
Matériaux synthétiques - bitume	20 à 30%	Toxicité, goût, odeur
Végétation extensive	30 à 50%	Bactéries, MES, coloration
Végétation intensive peu élaborée	60 à 70%	Bactéries, MES, coloration
Végétation intensive élaborée	80 à 90%	Bactéries, MES, coloration
Toiture en pente		
Tuiles	15 à 25%	-
Bois	25 à 35%	Coloration, MES
Végétation	75%	Bactéries, MES, coloration

Tableau 4: Taux de pertes en eau de pluie en fonction de la nature de la toiture et effets indésirables (source : de Meester, 2009)

Dans notre cas, la toiture est à doubles pans en tuiles de terre cuite disposées à la romaine et de couleur moyenne. Elle convient donc parfaitement dans l'optique d'une récolte maximale des eaux pluviales.

LES CORNICHES ET LES GOUTTIERES

Vu la vétusté des équipements en place, il faudra envisager la mise en œuvre de nouvelles corniches et de gouttières. A nouveau, certains matériaux sont à privilégier. Nous pouvons par exemple citer l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le PVC et la faïence. Comme pour le revêtement de la toiture, les métaux tels que le plomb, le cuivre et l'aluminium sont à proscrire, mais également le zinc. En effet, contrairement à la toiture, les eaux pourraient stagner au sein de la corniche, mettant en solution des particules de zinc, toxiques pour la santé.

LES FILTRES

Avant que l'eau de pluie ne pénètre dans la citerne, il est nécessaire de la filtrer afin d'éviter l'introduction de toutes sortes d'impuretés et de poussières dont elle se serait chargée en ruisselant sur la toiture (feuilles mortes, cadavres d'animaux,...). Il existe une multitude de filtres différents, et les produits proposés sur le marché s'améliorent d'année en année. A l'heure actuelle, il existe deux grands types de filtres : les filtres autonettoyants et ceux qui ne le sont pas.

Le choix des filtres s'opère sur des critères tels que le coût, l'entretien, la surface de la toiture et les pertes d'eau engendrées. Les filtres autonettoyants ont l'avantage de ne pas nécessiter d'entretien quotidien mais, de par leur fonctionnement, engendrent souvent des pertes élevées et pouvant s'avérer non-négligeables pour une habitation autonome.

LES FILTRES A FEUILLES

Les filtres les plus classiques sont de simples filtres à feuilles, également appelés crapaudines. Ils sont constitués d'un grillage relativement poreux destiné à retenir les feuilles et cadavres en amont des gouttières. Ils doivent être vérifiés fréquemment car un colmatage peut entraîner des débordements de corniches avec de lourdes pertes (Orszagh, 2012).



Figure 24: Filtre à feuilles (source : google.com, 2012)

LES FOSSES A SEDIMENTS

Il est courant de placer une fosse à sédiments en amont de la citerne, généralement au point de rencontre de plusieurs canalisations (chambre de visite par exemple). Ces filtres ont une porosité de 100 microns, ils sont bon marché et efficaces mais demandent un entretien et une surveillance régulière (Orszàgh J., 2012). Ce type de dispositif permet de réduire la quantité de particules en suspension qui sont à l'origine de formation de boues dans le fond de la citerne.



Figure 25: Fosse à sédiments (source: Vu, 2006)

LES FILTRES AUTONETTOYANTS

Les filtres autonettoyants tels que les filtres à collecteur fonctionnent de manière totalement différente. Ils ont été élaborés sur l'observation que les eaux qui s'écoulent dans une gouttière ruissellent principalement le long des parois. Un tamis d'une porosité de 0,17mm placé le long de ces parois admet le passage de l'eau tandis que les impuretés restent prisonnières au centre de la canalisation. Leur entretien peut alors être réduit à une fois par an, et les filtres ne doivent pas être remplacés mais simplement nettoyés. Environ 10% de l'eau collectée est cependant évacuée en même temps que les saletés (Deltau G., 2004).



Figure 26: Filtre autonettoyant (source : Vu, 2006)

FILTRES A PLANTES

Nous l'avons dit, les filtres à eau de pluie font l'objet de progrès permanents. C'est une alternative totalement novatrice que nous propose Hugo Vanderstadt (2011). En effet, les filtres actuellement sur le marché possèdent l'inconvénient soit de devoir être entretenus régulièrement, soit d'engendrer des pertes importantes en eau. Pour remédier à cela, l'auteur nous propose de rassembler l'ensemble des eaux de pluies provenant de la toiture en un bassin de plantes, dimensionné à 5% de la surface de récolte. Ces plantes, grâce à leurs racines, joueraient le rôle de filtre en retenant la majeure partie des particules en suspension. Elles demandent peu d'entretien, tout au plus un élagage annuel, ne doivent pas être remplacées et ne représentent pas un investissement important. De plus, les pertes sont réduites à la simple évaporation à la surface du plan d'eau. D'après M. Vanderstadt (2011), les eaux ainsi épurées n'auraient plus besoin d'être filtrées en sortie de citerne, excepté pour leur potabilisation. Néanmoins, comme pour tout système novateur, nous ne pouvons être certains, à l'heure actuelle, des bienfaits de cette filtration de l'eau pluviale par les plantes. En effet, celles-ci sont généralement utilisées pour le traitement des eaux usées. Il s'opère alors des réactions chimiques qui changent la composition intrinsèque de l'eau. De ce fait, il se pourrait que ce système de filtration entraîne une modification des caractéristiques naturelles bénéfiques de l'eau pluviale. L'idéal serait d'entreprendre une série de tests en laboratoire vérifiant la qualité de l'eau en sortie du système. Peut-être trouverons-nous cette nouvelle méthode sur le marché d'ici quelques années...

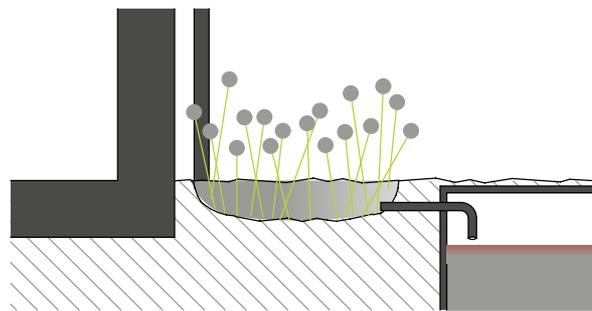


Figure 27: Filtre à plantes (réalisation : Monaco, 2012)

En conclusion, nous privilégierons, dans le cas qui nous occupe, les systèmes classiques de filtration n'entraînant pas de pertes supplémentaires. Nous prévoyons donc des filtres à feuille complétés par une fosse à sédiments. Cela engendrera un surcroît d'entretien pour les propriétaires qui devront y être sensibilisés.

4.2.2.2 LA CITERNE A EAU DE PLUIE

La citerne est probablement l'investissement le plus conséquent d'un système de récolte des eaux pluviales. Dès lors, il est primordial d'étudier soigneusement les différentes solutions qui s'offrent au consommateur afin d'émettre un choix adapté aux besoins et à la consommation du ménage. Concernant le choix de la cuve, deux questions se posent, à savoir où mettre la citerne et quel matériau choisir ?

LE POSITIONNEMENT DE LA CITERNE

Pour le positionnement de la citerne, plusieurs choix s'offrent à nous. Certains optent pour une citerne placée dans le grenier. Ce système permet de faire l'économie d'une pompe en utilisant la gravité pour assurer une pression de distribution dans les canalisations. Il faut néanmoins disposer d'un grenier d'une superficie suffisante et la citerne peut difficilement excéder quelques centaines de litres.

Une alternative consiste à poser la citerne directement dans le jardin. Cela évite la réalisation de travaux d'excavation mais la présence de la citerne peut avoir un impact

esthétique néfaste. Une solution serait dès lors de mettre en place un mur de végétation capable de la dissimuler.

Le choix le plus souvent adopté est celui d'une citerne enterrée. Ce système présente de nombreux avantages, mais peut ne pas convenir dans certains cas particuliers. Il faut tout d'abord disposer d'une surface au sol suffisante, de préférence hors de la circulation des véhicules qui engendre des contraintes techniques supplémentaires (résistance mécanique, aux vibrations,...) (Vu, 2006). La nature du sol peut également influencer ce choix, comme par exemple en présence d'argile gonflante, augmentant les risques de fissuration de la cuve. Il en est de même en ce qui concerne les racines des arbres. Au rayon des inconvénients, citons les risques de contamination par le sol et l'obligation d'installer une pompe (Abdulla & Al-Shareef, 2008). Par contre, ce système possède un avantage indéniable qui est de maintenir l'eau dans des conditions favorables. Celle-ci est en effet protégée du rayonnement solaire et conservée à une température constante et fraîche, évitant ainsi le développement d'algues et de bactéries indésirables. Nous nous dirigerons donc vers cette solution.

LE MATERIAU DE LA CITERNE

Il existe trois sortes de cuves à enterrer pour la récupération des eaux de pluie que sont les cuves en polyéthylène, les cuves en béton et les cuves en acier (Vu, 2006).

Les cuves en acier sont relativement peu utilisées dans le domaine domestique. Leur capacité élevée en fait un choix plus judicieux pour les applications industrielles.

Les cuves en polyéthylène sont souvent favorisées par les particuliers grâce à leur légèreté, facilitant le transport et la mise en œuvre ainsi que leur prix compétitif. Contrairement aux idées reçues, l'énergie dépensée pour la fabrication d'une cuve polyéthylène est à peu près égale à celle nécessaire pour une cuve en béton. L'un de leurs inconvénients majeurs est cependant leur capacité, avec un volume souvent limité à 10 m³, même s'il est possible de les monter en série.

L'inconvénient majeur des cuves en béton est leur poids puisque les citernes de grande capacité peuvent parfois peser plusieurs tonnes. Selon les cas, il ne sera donc pas toujours possible d'opter pour une citerne en béton, leur mise en place nécessitant des engins de manutention conséquents et une accessibilité aisée au jardin. Elle présente cependant l'avantage de neutraliser l'acidité naturelle de l'eau de pluie et de la reminéraliser.

Outre les facilités de mise en œuvre, le choix d'une cuve en polyéthylène ou d'une cuve en béton dépendra donc principalement de l'utilisation que l'on désire en faire. Si l'eau récoltée est destinée à l'arrosage du jardin et au nettoyage de la voiture, le particulier préférera une cuve en polyéthylène. S'il veut l'utiliser pour l'hygiène corporelle et la consommation, il préférera une cuve en béton.

NEUTRALISATION ET MINERALISATION DE L'EAU DE PLUIE DANS UNE CITERNE EN BETON

Selon le scientifique J. Orszagh (2012), la citerne en béton permet de se rapprocher davantage des conditions (température, pH et composition chimique) d'une cavité rocheuse telles que rencontrées dans la nature et qui permet de conférer à l'eau toute sa qualité.

En effet, les composants acides de l'eau de pluie vont réagir avec les composants basiques du béton, neutralisant l'acidité de l'eau et mettant en solution des sels minéraux. Ces sels minéraux sont principalement composés d'hydrogénocarbonates de calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, mais on y trouve également en faible quantité des ions nitrates et sulfates provenant d'une réaction de l'acide nitreux, de l'acide nitrique et du dioxyde de soufre causés par les pollutions atmosphériques. Au final, si l'eau qui tombe sur le toit est acide et contient très peu de sels minéraux, celle contenue dans une citerne en béton deviendra neutre à

légèrement basique (pH entre 7,5 et 8,5) et faiblement minéralisée (50 à 80 mg/l, on ajoute habituellement des sels minéraux à l'eau sous 10 mg/l).

Caractéristiques	Eau de pluie	Eau de citerne en béton
Acidité	pH \approx 6,3	pH \approx 8
Sels minéraux (mg/l)	< 0,46	\approx 65

Tableau 5: Comparaison des caractéristiques de l'eau de pluie et de l'eau d'une citerne en béton (source : Orszàgh, 2012)

Les réactions chimiques qui s'opèrent avec le béton n'ont pas d'influence réelle sur la durée de vie de la citerne. Une étude a montré que la réduction d'épaisseur des parois est inférieure à 10 mm en 100 ans (Deltau, 2004). Attention cependant que, durant les premiers mois, les réactions chimiques seront d'une telle intensité que l'eau de citerne sera de basicité trop élevée pour un emploi domestique (pH \approx 10). Il faudra attendre 3 à 6 mois avant que l'eau ne soit réellement utilisable. Durant cette période, l'eau peut cependant être employée pour les travaux de fin de chantier (Orszàgh, 2012).

ALTERNATIVES A LA CITERNE EN BETON

Comme nous l'avons abordé ci-dessus, il n'est pas toujours possible de mettre en place une citerne en béton chez soi. Ceci est d'autant plus vrai que, lorsqu'on recherche une autonomie totale en eau, la capacité totale de stockage s'élève généralement à plusieurs dizaines de mètres cubes. Plusieurs alternatives sont dès lors envisageables.

L'une des solutions serait de privilégier la mise en série de plusieurs citernes en béton de capacité réduite. Celles-ci pourraient être reliées entre elles de deux manières, soit par le haut, soit par le bas. Relier les citernes par le bas et ainsi favoriser un système de vases communicants semble être la solution la plus avantageuse. Néanmoins, cela n'est possible que s'il n'existe aucun risque de tassement différentiel sous les citernes. De tels phénomènes seraient en effet susceptibles de rompre les canalisations reliant ces dernières, entraînant une perte totale des eaux récoltées. Dans la pratique, il sera donc plus aisé de favoriser une connexion par le haut, fonctionnant au moyen d'un système de trop-plein. Cependant, cela entraîne une multiplication des dispositifs de puisage, et donc un surcoût.

Une alternative consiste à installer une citerne en plastique, avec une citerne de décantation en béton (20% du volume total) placée en amont. Le temps de contact avec le béton serait suffisant pour neutraliser l'acidité et reminéraliser l'eau. Il est également envisageable de placer dans le fond de la citerne en plastique des sacs de granules calcaires qui rempliraient ce rôle. Cela complique néanmoins le nettoyage des boues.

Finalement, de nombreux particuliers optent pour une solution toute autre en fabriquant leur citerne en béton ou en maçonnerie. Celle-ci doit alors être recouverte d'un cimentage étanche afin de bénéficier de l'effet de neutralisation du béton tout en évitant les pertes.



Figure 28: Citerne en maçonnerie (source : Deltau, 2004)

C'est la solution pour laquelle nous opterons. Ce système offre l'avantage de récolter toute l'eau dans une et une seule citerne, de capacité bien plus élevée que les produits disponibles sur le marché, évitant les inconvénients de raccord cités ci-dessus.

4.2.2.3 LA CITERNE ET SES EQUIPEMENTS

La cuve doit, de préférence, être constituée de deux compartiments. Le premier sert de décanteur et a un volume égal à 20% du volume total nécessaire. Les matières en suspension vont se transformer en boues et précipiter dans le fond de la citerne tandis que les surnageants, tels que le pollen, vont former un couvercle à la surface. Un coude, placé en partie supérieure et dirigé vers le bas pour ne pas entrainer les surnageants, conduit l'eau vers l'espace de stockage. Ce tuyau déverse l'eau dans la citerne principale via un coude placé en partie basse, orienté vers le haut afin de ne pas remuer les boues formées dans le fond.

C'est dans ce second bassin que se trouve la majeure partie des équipements. La citerne doit être équipée d'un système de trop-plein. Il peut s'agir d'un simple puisard, à savoir une cavité creusée dans le sol et remplie de graviers drainants qui permettront l'infiltration des eaux en surplus dans le sol. Le puisard doit être dimensionné de façon à pouvoir évacuer l'entièreté des précipitations et ses dimensions dépendront également de la perméabilité du sol. De manière générale, on compte qu'un puisard de 1 m³ par volume de stockage de 10 m³ est suffisant (Orszagh, 2012).

La citerne est également équipée d'un tuyau souple d'aspiration couplé à une crépine flottante. C'est ce tuyau qui, grâce à une pompe, acheminera l'eau vers l'habitation. On y adjoint généralement un aérateur à bulle, qui peut être une simple pompe d'aquarium, dont le but est d'éviter le développement excessif de bactéries en oxygénant l'eau. Ces deux dispositifs sont cependant consommateurs d'électricité et devront être abordés par la suite. Une jauge pneumatique de niveau est prévue afin que les propriétaires aient un contrôle permanent sur le contenu de leur citerne. Cela leur permettra de détecter une éventuelle fuite et, en cas de sécheresse, d'adapter leur consommation.

Le décanteur, et dans une moindre mesure le réservoir, doivent être entretenus afin d'évacuer les boues formées. On conseille pour ce faire de carreler le fond de la citerne, ce qui facilite nettement l'entretien. Certains constructeurs conseillent un entretien annuel, d'autres tous les deux ans voire tous les 4 ou 5 ans. En réalité, la formation de boues dépend avant tout de la qualité de l'eau de pluie. Si elle est peu chargée en polluants, moins de boues se formeront. Lorsqu'une habitation dépend totalement de l'eau de pluie, l'entretien peut poser un réel problème car le décanteur doit être mis à sec. L'entretien assidu des filtres à eau de pluie et de la fosse à sédiments est donc un paramètre essentiel afin de limiter l'inconfort causé par cet entretien.

Le schéma suivant récapitule finalement les équipements essentiels pour la récolte des eaux de pluie.

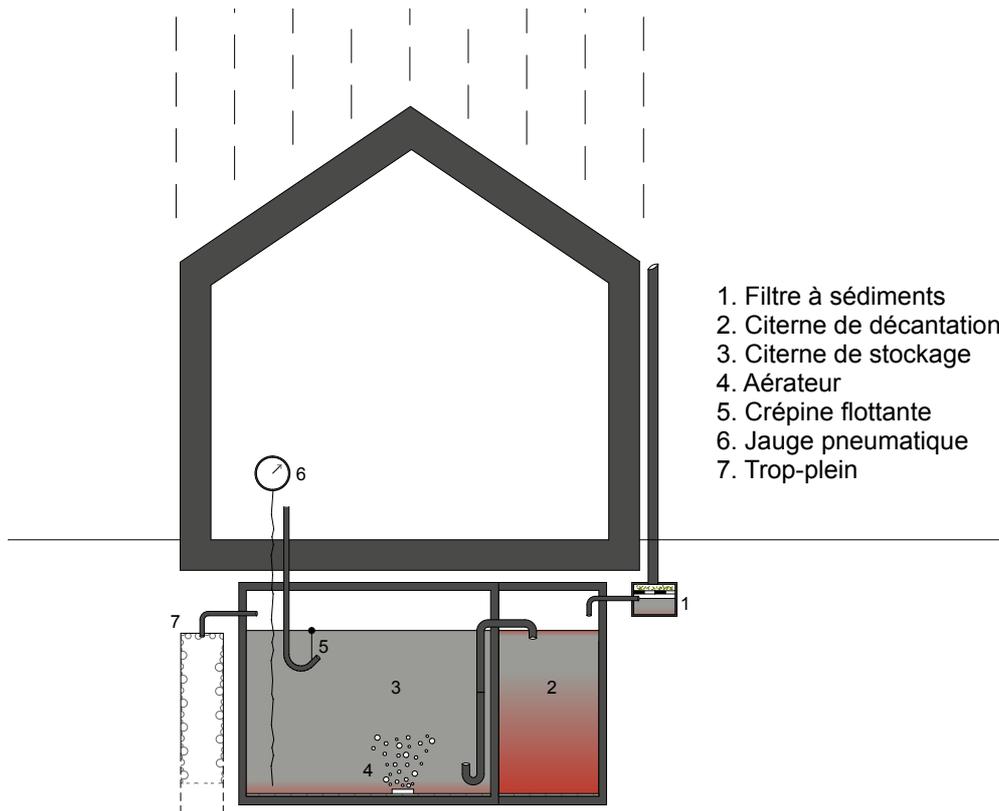


Figure 6: Système de récolte des eaux de pluie (réalisation : Monaco, 2012)

4.3 L'EAU DOMESTIQUE

4.3.1 QUALITE DE L'EAU DOMESTIQUE

Si aujourd'hui les particuliers utilisent l'eau potable de leur robinet de manière indistincte pour tous les usages domestiques, il n'est en vérité que peu d'usages nécessitant véritablement une eau de cette qualité. En moyenne, chaque personne n'a besoin que de 3 à 5 litres d'eau potable par jour, pour la boisson et la cuisine. Si l'on désire privilégier une approche durable de la gestion de l'eau, il est indispensable d'adapter sa qualité à l'usage. Ainsi, pour tous les autres usages y compris l'hygiène corporelle, une qualité moindre peut suffire (Orszagh, 2012).

4.3.1.1 EAU DE QUALITE INOFFENSIVE

L'eau de qualité inoffensive n'est pas potable au sens légal du terme car elle contient quelques centaines de bactéries banales et quelques dizaines de bactéries de contamination fécale (coliformes, streptocoques) par 100 ml. Son absorption accidentelle ne pose néanmoins aucun préjudice à la santé d'un individu, le système immunitaire étant à même de maîtriser ces bactéries. La qualité de cette eau s'apparente en fait à la qualité des eaux de baignade. Elle convient à toutes les applications non-alimentaires telles que l'hygiène corporelle, la vaisselle, le linge et bien sûr le nettoyage et l'arrosage du jardin, même si l'on préférera dans ces derniers cas utiliser directement l'eau de la citerne dont la qualité est déjà bien suffisante.

L'eau de la citerne est loin d'être de moins bonne qualité que l'eau de distribution. Elle est même mieux adaptée à l'usage domestique qu'on lui confère puisque, naturellement douce,

elle irrite beaucoup moins la peau, diminue l'emploi de détergents et augmente la durée de vie des équipements.

4.3.1.2 EAU POTABLE

Une eau potable doit être agréable à boire et sans risque pour la santé » (Wandji Mbatchou, 2004). Plus particulièrement, elle doit répondre à des critères physico-chimiques, bactériologiques et esthétiques. Elle doit avoir bon goût, être sûre pour la santé, claire, sans odeur et sans couleur, douce et non-corrosive et ne pas contenir d'agents biologiques (Gray, 2010). Afin d'assurer le respect de ces critères, des normes ont été établies pour définir la qualité d'une eau potable. Ces normes se basent sur l'évaluation d'une cinquantaine de paramètres physico-chimiques et microbiologiques, mais les valeurs tolérées peuvent varier selon les pays. En réalité, la notion d'eau potable n'est qu'un concept juridique fixé par la loi et destiné à produire une eau de qualité acceptable pour la consommation humaine (Orszàgh, 2012). Voici, à titre informatif, la comparaison entre les taux tolérés de quelques éléments au sein de l'eau potable pour la Belgique, l'OMS et l'Union Européenne.

Paramètres	Unités	Belgique	OMS	UE
Acidité	-	6,5 à 9,5	6,5 à 9,5	6,5 à 9,5
Conductivité	µS/cm	< 2100	250	250
Nitrates NO ₃ -	mgN/l	< 11,3	< 50	< 50
Ammonium NH ₄ ⁺	mgN/l	< 0,5	-	< 0,5
Chlorures	mg/l	< 350	-	< 250
Sulfates SO ₄ ²⁻	mg/l	< 250	< 500	< 250
Zinc	µg/l	< 5000	3000	NC ⁶
Fer	µg/l	< 200	-	< 200
Cadmium	µg/l	< 50	< 3	NC
Plomb	µg/l	< 50	< 10	< 10

Tableau 7: comparaison quantitative des qualités de l'eau potable en Belgique, OMS et pour l'Union Européenne (réalisation : Monaco, sources : Orszàgh, 2012 et lenntech.com, 2012)

Généralement, c'est l'idée qu'il faut annihiler la présence de toute bactérie dite pathogène qui détermine les normes légales pour l'eau potable. Or, entre le moment où elle quitte la cuve du château d'eau et celui où nous l'ingérons, elle est susceptible d'avoir été contaminée par des agents pathogènes. Il suffit, par exemple, d'utiliser un verre mal nettoyé. L'organisme humain est en fait tout-à-fait capable de supporter l'ingestion en faible quantité de ces bactéries et croire que nous buvons une eau totalement aseptisée est un leurre.

En France, être raccordé au réseau public d'alimentation en eau potable est une obligation. Pour les habitats qui ne le sont pas, l'administration a un droit de regard sur la qualité de l'eau qui se trouve dans le verre du consommateur non-raccordé, en violation de la loi relative à la protection de la vie privée (Orszàgh, 2012). Il s'agira donc d'un vrai challenge pour faire accepter aux autorités le désir d'autonomie des propriétaires. D'après M. Grimaud (2011), il est cependant tout à fait possible d'obtenir une dérogation dans la commune de Grâne.

4.3.2 CONSOMMATION EN EAU DOMESTIQUE

On considère qu'en moyenne, un français consomme 140 litres d'eau par jour. Cette consommation se répartit selon divers usages tels que l'alimentation, l'hygiène corporelle, le lavage du linge, de la vaisselle, le nettoyage, les toilettes ou encore l'arrosage du jardin (Deltau, 2004).

⁶ NC signifie "non communiqué".

Usage	Quantité (l/j.hab)
Alimentation	4
Hygiène	43
Vaisselle	17
Lessive	17
Nettoyage	8
WC	45
Jardin	6
Total	140

Tableau 8: consommation moyenne journalière en eau par habitant (réalisation : Monaco ; source : Deltau, 2004)

Il est cependant assez aisé, en prenant quelques dispositions simples, de diminuer significativement cette consommation. Deux paramètres majeurs influencent la quantité d'eau consommée par un individu à savoir la mise en place d'équipements économes en eau et la sensibilisation des habitants. Dans le cas d'une habitation autonome en eau, ces deux paramètres jouent un rôle absolument fondamental.

4.3.2.1 LA SENSIBILISATION DES HABITANTS

La toute première mesure pour diminuer sa consommation d'eau est d'opérer un changement de comportement, voire de mentalité. La mise en place de quelques gestes simples peut déjà avoir un impact significatif. On conseillera par exemple aux habitants de couper l'eau lorsqu'ils se brossent les dents ou se savonnent sous la douche. Le fait de favoriser une douche par rapport à un bain permet d'économiser jusqu'à 50% de l'eau destinée à l'hygiène corporelle. Il est également conseillé de bien remplir la machine à lessiver et le lave-vaisselle avant de les faire tourner (Orszàgh, 2012). Les habitants doivent en outre veiller à toujours bien fermer le robinet après usage et prendre garde aux fuites éventuelles. Ces fuites peuvent en effet avoir des conséquences désastreuses sur la consommation d'un ménage et sont pourtant facilement évitables. Le tableau suivant permet de quantifier ces pertes.

Fuites	Quantité d'eau gaspillée (litres par heure)
Evier qui goutte	4 l/h
Filet mince d'eau	16 l/h
Gros filet d'eau	63 l/h
Chasse des WC qui coule	25 l/h

Tableau 9: Quantification des pertes en eau dues aux fuites (source : De Herde & Trachte, 2010)

4.3.2.2 LES SYSTEMES ET EQUIPEMENTS ECONOMES

Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes à adjoindre aux dispositifs d'amenée d'eau permettant des économies notoires d'eau. Les équipements actuels tels que lave-vaisselle, lave-linge et chasses d'eau sont bien plus économes qu'auparavant.

Les systèmes disponibles sur le marché permettent principalement de réduire ou d'adapter la consommation. Il existe par exemple des détecteurs de fuite, des réducteurs de pression ou encore des limiteurs de débit dynamique qui fixent le débit indépendamment de la pression d'alimentation. Les mitigeurs thermostatiques font désormais partie des équipements de base dans les nouvelles constructions, mais les robinets à position centrale froide représentent également un avantage indéniable.

La chasse des toilettes est le poste qui consomme le plus d'eau par habitant sur une journée. Toute cette eau n'est pas nécessaire à l'évacuation des excréta. Il est possible, depuis plusieurs années, de favoriser une chasse à deux vitesses ou à position marche/arrêt, permettant une économie substantielle d'eau. Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble de ces équipements et les économies en eau qu'ils permettent.

Systèmes	Economies en eau	Remarques
Réseau de distribution		
Détecteur de fuites	35 m ³ /an	
Réducteur de pression	2 à 10 l/min (selon pression)	Améliore la durée de vie de l'installation. Réduit le bruit dans les canalisations.
Robinetterie et accessoires		
Réducteur de flux dynamique	55%	Directement incorporé à l'évier et maintient le flux constant indépendamment de la pression d'alimentation
Mitigeur thermostatique	65%	Régule la température et le flux. Améliore le confort.
Robinet à position centrale froide	20% par rapport à un système standard.	Fournit de l'eau froide lorsque le robinet est en position centrale, contrairement à un système classique qui fournit de l'eau chaude.
Chasses d'eau (WC)		
Chasse à deux vitesses	53% par rapport à une chasse de 9l.	Dilution des pollutions moins importante
Chasse avec marche-arrêt	50% par rapport à une chasse de 9l.	Dilution des pollutions moins importante

Tableau 10: Récapitulatif des systèmes économes en eau (source : De Herde & Trachte, 2010)

Désormais, il existe également des systèmes de réutilisation de l'eau de douche et de bain pour la chasse des WC. Ces dispositifs pourraient couvrir 80 à 90% des besoins de la chasse. Cela implique néanmoins le stockage des eaux usées durant plusieurs heures dans des réservoirs fermés, en conditions anaérobies. Dans ces conditions, le soufre contenu dans les produits détergents se transforme en ions sulfures, responsables de mauvaises odeurs. Pour éviter cela, il est indispensable d'utiliser des produits chimiques et onéreux tels que le chlore (de Herde & Trachte, 2010 ; Orszagh, 2012). A priori, ce dispositif semble être une alternative attirante dans le cadre d'une maison autonome. Pourtant, le taux de couverture des besoins de la chasse est calculé en considérant une habitation de consommation moyenne et l'utilisation d'une baignoire. Dans ce projet, il n'y a que des douches et les habitants seront en principe sensibilisés à la limitation de leur consommation. Dans le meilleur des cas, il faudra tout de même consacrer au minimum 5 litres par jour et par personne à l'eau des toilettes. Cette eau contiendra en outre des agents bactéricides (le chlore) susceptibles de compliquer son épuration. Ce système requiert également l'utilisation d'une pompe, consommatrice d'électricité. Pour toutes ces raisons, cette alternative n'est pas appropriée à la logique d'un habitat autonome.

4.3.2.3 LES TOILETTES SECHES

Les toilettes sèches s'inscrivent quant à elles dans une démarche parfaitement cohérente avec ce projet. Celles-ci permettent non seulement une économie de 33% de la consommation d'eau globale du ménage, mais elles possèdent également des avantages indéniables d'un point de vue écologique.

Les eaux usées d'un ménage se divisent en deux catégories que sont les eaux grises et les eaux noires. Les premières sont issues de l'hygiène corporelle, de la cuisine, des machines à lessiver et du nettoyage et sont à ce titre chargées en savons, graisses et détergents. Les eaux noires, également appelées eaux vannes, sont issues des WC. Elles constituent la

principale source de pollution des eaux car elles contiennent des résidus de médicaments, des bactéries pathogènes et toutes sortes d'autres éléments néfastes (cf. 4.4.1.1 *Les différentes source de pollution*). On commence à peine, aujourd'hui, à mesurer l'impact du rejet de ces eaux sur le milieu naturel. Ainsi, les hormones rejetées dans les eaux suite à la prise de la pilule contraceptive auraient un effet catastrophique sur le cycle de reproduction des poissons et amèneraient à une évolution croissante du nombre de poissons femelles (Cabrit-Leclerc, 2010).

Au-delà des simples économies en eau, l'utilisation de toilettes sèches s'inscrit dans une véritable logique de gestion durable des eaux. Il en existe divers types mais toutes ne présentent pas le même intérêt pour l'environnement. Actuellement, les toilettes à litière biomaitrisée (TLB) sont les plus performantes dans le domaine (Orszagh, 2012). Nous privilégierons donc ce dispositif, dont le fonctionnement est détaillé ci-dessous.



Figure 29: Photographie d'une TLB chez un particulier (source : habitat-ecologique.org, 2012)

FONCTIONNEMENT GENERAL DES TOILETTES A LITIERE BIOMAITRISEE

Dans une toilette à litière biomaitrisée, les urines et les fèces sont mélangées à de la cellulose. Celle-ci provient de sciures et copeaux de bois, récupérés dans les scieries ou produits sur place, qui doivent être répandus après chaque utilisation. C'est précisément grâce à ce mélange que les nuisances olfactives sont maîtrees.

Les odeurs sont en réalité liées à la transformation dans l'urine de l'azote organique en ions d'ammonium sous l'action d'une enzyme, l'uréase. Cette enzyme est capable d'hydrolyser l'urée en dioxyde de carbone (CO₂) et en ammoniac (NH₃), provoquant l'odeur piquante caractéristique de l'urine. Dans le réservoir d'une TLB, la cellulose végétale bloque par inhibition ces réactions enzymatiques, évitant ainsi l'apparition d'odeurs (Orszagh, 2012). L'utilisation de papier WC est bien sûr autorisée à condition qu'il ne soit ni coloré, ni parfumé (Cabrit-Leclerc, 2010). Il pourra dans ces conditions participer à l'apport de cellulose du mélange.

OBJECTIF ECOLOGIQUE DE LA TLB

Les toilettes à litière biomaitrisée ont pour objectif de reconduire les déjections dans le cycle de formation de l'humus. En mélangeant les excréments à de la matière cellulosique, on évite la minéralisation des matières organiques sous l'action des enzymes. Au-delà du fait que cela évite la production d'odeur, cela provoque également le mélange entre matière végétale (haute teneur en carbone) et matière animale (haute teneur en azote), nécessaire à la

production d’humus, i.e. d’engrais naturel. Les TLB permettent donc la valorisation des excréta dans la nature.

Biomasse végétale	Biomasse animale
Bois, feuilles mortes, pailles, tiges, ...	Dépouilles d’animaux, déjections animales et humaines.
Riche en carbone, pauvre en azote	Riche en azote, pauvre en carbone

Tableau 11: Constituants nécessaires à la production d’humus (source : Orszàgh, 2012)

Au-delà de cet apport cellulosique, il est nécessaire d’épandre le mélange à même le sol naturel pour que l’humification ait lieu, les matières carbonées du sol devant participer au processus (Orszàgh, 2012).

LES TOILETTES A LITIERE BIOMAITRISEE EN FRANCE

L’article 17 de l’Arrêté du 7 septembre 2009 sur la réglementation des toilettes sèches en France autorise leur emploi, mais avec quelques restrictions. L’article précise les conditions de mise en œuvre suivantes : « Les toilettes sèches sont composées d’une cuve étanche recevant les fèces ou les urines. La cuve est régulièrement vidée sur une aire étanche conçue de façon à éviter tout écoulement et à l’abri des intempéries ». Il précise un peu plus loin : « les sous-produits issus de l’utilisation de toilettes sèches doivent être valorisés sur la parcelle ». Ces deux points sont totalement contradictoires. Comment valoriser les excréta lorsqu’on sait qu’un bon compost se fait à même le sol ? Peut-être les autorités entendent-elles par là qu’un dispositif étanche doit être prévu sous terre afin d’éviter toute dispersion, mais cela demanderait un éclaircissement.

Ces imprécisions législatives n’empêchent pas pour autant les français d’utiliser ce dispositif. Une enquête réalisée en 2010 par le site internet « habitat-écologique » révèle en effet que plus de 1700 foyers utilisent ce dispositif, dont 33 dans la Drôme.

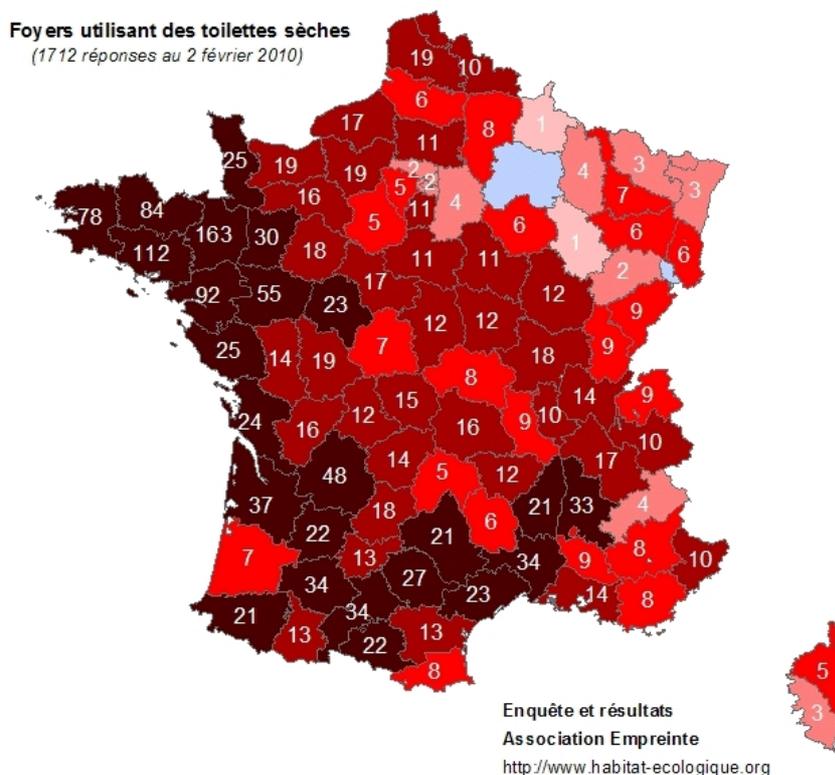


Figure 30: Répartition par département du nombre de foyers utilisant des toilettes sèches en 2010 (source : habitat-ecologique.org, 2012)

4.3.2.4 BILAN FINAL DES CONSOMMATIONS

Une fois ces quelques précautions prises (sensibilisation, équipements économes, toilettes sèches), il est possible de réduire considérablement la consommation en eau d'un ménage. Gerhard Deltau estime que l'on peut la diminuer d'un tiers sans perdre en confort, ce qui nous donne environ 80 à 90 l/j.hab pour un ménage économe. Ces gains se répercutent sur l'ensemble des consommations, excepté les besoins alimentaires.

Dans le cas qui nous occupe, nous avons fait le choix de supprimer les toilettes à chasse au profit de toilettes à litière biomatrisée. De plus, il semble judicieux de supprimer la consommation liée à l'arrosage du jardin, la maison s'insérant dans un site naturel qui s'auto-suffit. La consommation globale que nous considérerons pour notre ménage s'élèvera finalement à 59 l/j.hab, comme le montre le tableau suivant.

Usage	Consommation en l/j.hab			Remarques
	Ménage normal	Ménage économe	Ménage étudié	
Alimentation	4	4	4	
Hygiène	43	26	26	
Vaisselle	17	12	12	
Lessive	17	12	12	
Nettoyage	8	5	5	
WC	45	28	-	Utilisation de TLB
Jardin	6	3	-	Pas de jardin – site naturel auto-suffisant
Total	140	90	59	

Tableau 12: comparatif des consommations d'un ménage moyen et économe en France et du ménage étudié (réalisation : Monaco, 2012)

4.3.3 SYSTEMES DE POTABILISATION DE L'EAU PLUVIALE

Il existe divers procédés permettant de rendre une eau propre à la consommation. L'expérience a montré qu'il n'est pas toujours nécessaire de mettre en œuvre des techniques complexes pour s'assurer de la qualité d'une eau. Depuis toujours, l'Homme a mis en place quelques procédés très simples permettant de rendre « buvable » une eau de qualité médiocre. L'ébullition de l'eau à 100°C à une altitude inférieure à 1000 mètres pendant au moins une minute permet par exemple d'inactiver les micro-organismes pathogènes non sporulants. Ce système permet donc de stériliser l'eau puisque les bactéries telles qu'E. Coli, la salmonelle ou même le virus de l'hépatite A sont rendus inoffensifs par ce processus (Wandji Mbatchou, 2004).

Les procédés envisagés dans cette section ne sont cependant pas des méthodes de fortune comme celle de l'ébullition, mais des procédés avérés et couramment utilisés à l'échelle domestique. L'enjeu est énorme, principalement pour les pays en voie de développement. Les procédés de potabilisation de l'eau font donc l'objet de recherches constantes et sont en perpétuelle évolution. Actuellement, les traitements appliqués peuvent être de deux types : chimiques ou physiques.

4.3.3.1 PROCÉDES CHIMIQUES

Les procédés chimiques sont des procédés couramment utilisés pour la production d'eau potable. Il s'agit de techniques biocides très efficaces mais qui tuent indistinctement tout ce qui vit dans l'eau, même les éléments inoffensifs voire indispensables. Ils éliminent notamment la quasi-entièreté des sels minéraux présents dans l'eau. C'est d'ailleurs pour

cette raison que des sels minéraux sont généralement ajoutés à posteriori, engendrant un surcoût pour le consommateur (Orszàgh, 2012).

LE CHLORE

La mise en solution de chlore dans les procédés de potabilisation de l'eau est à ce jour l'une des techniques les plus employées, tant à l'échelle domestique qu'industrielle. Il s'agit d'un désinfectant chimique puissant qui permet de garantir la pureté microbienne de l'eau. Néanmoins, le chlore modifie le caractère électrochimique de l'eau. On observe entre autre une diminution du poids moléculaire, une dégradation de la couleur et un affaiblissement de l'absorption (Gérard et al., 2011). Malgré le fait que la teneur en chlore est extrêmement règlementée, une ingestion quotidienne d'eau chlorée exposerait en fait le consommateur à des risques pour sa santé. Concrètement, il est extrêmement difficile de juger de l'effet néfaste du chlore car celui-ci s'évalue sur le long terme. Les scientifiques restent cependant méfiants et d'autres méthodes, telles que l'ozonation, lui sont de plus en plus fréquemment substituées (Orszàgh, 2012).

L'ozone est un oxydant sélectif. Les mécanismes chimiques qui se produisent au contact de l'eau sont complexes et ne sont pas encore totalement élucidés, mais ils provoquent probablement, au même titre que le chlore, une modification profonde de sa structure (Gérard et al., 2011). L'ozonation n'est à l'heure actuelle utilisée qu'à échelle industrielle, nous ne développerons donc pas ce procédé dans ce mémoire.

LES ULTRAVIOLETS

L'utilisation de lampes UV pour la potabilisation de l'eau est en plein essor. Récemment, des chercheurs belges ont d'ailleurs mis au point un système destiné aux pays en voie de développement dont l'électricité nécessaire à la lampe UV serait produite en pédalant.

Les lampes UV sont utilisées en traitement secondaire afin de tuer les dernières bactéries ayant échappé à la filtration. En réalité, c'est principalement le spectre des UV-C ($153 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$) qui est à l'origine de la désinfection par irradiation solaire. On constate en effet qu'avec la baisse de la longueur d'onde, le taux d'inactivation des micro-organismes s'accroît. Les UV-A ($315 \text{ nm} < \lambda < 380 \text{ nm}$) et les UV-B ($280 \text{ nm} < \lambda < 315 \text{ nm}$) jouent donc un rôle moindre dans le processus.



Figure 31: Spectre ultraviolet (réalisation : Monaco ; source : Wandji Mbatchou, 2004)

Concrètement, l'eau circule dans un tube en quartz et est soumise au rayonnement de la lampe à ultraviolets. Le réacteur a une longueur d'environ 70 centimètres et la lampe a une consommation de 33 à 55 Watts pour une durée de vie de 13 000 heures. Une cellule mesure le flux afin de garantir le bon fonctionnement de la lampe (Boudellal, 2011).

La température de l'eau joue un rôle significatif dans la désinfection par UV. On constate en effet que le taux de désactivation des bactéries et virus augmente pour des températures supérieures à 50°C. Curieusement, une température élevée de l'eau favoriserait donc la désinfection par UV (Wandji Mbatchou, 2004).

Certains scientifiques demeurent néanmoins sceptiques sur les éventuels effets secondaires que pourrait engendrer cette méthode. Nous connaissons les effets néfastes que peuvent

avoir les ultraviolets sur l'organisme humain (cancer,...). Les scientifiques s'interrogent donc sur l'impact de l'absorption d'UV par l'eau. Que devient l'énergie absorbée ? Est-elle simplement réémise sous forme d'infrarouges, sans impact sur la composition de l'eau, ou engendre-t-elle, au même titre que le chlore ou l'ozone, une modification de la structure de l'eau par excitation des électrons ? Les interactions précises au sein de l'eau sont encore inconnues et divisent les scientifiques. Il aurait néanmoins été constaté que des plantes abreuvées par une eau ainsi traitée souffriraient de troubles de l'évolution (Orszàgh, 2012). Au même titre que pour le chlore, il sera difficile de trouver une réponse satisfaisante à la question.

4.3.3.2 PROCÉDES PHYSIQUES

Les procédés physiques utilisés pour la potabilisation de l'eau sont ce qu'on appelle la filtration à membrane. Cela consiste en l'utilisation de filtres, souvent en polymères synthétiques – mais pas nécessairement, nous le verrons – pour épurer l'eau des bactéries qu'elle contient. Selon la finesse des pores du filtre utilisé, ces procédés sont appelés microfiltration, ultrafiltration ou encore nanofiltration (Gray, 2011). Nous n'aborderons cependant pas la nanofiltration ici car il s'agit d'un procédé peu utilisé à l'échelle domestique et souvent remplacé par le procédé d'adsorption.

EAU DE QUALITE INOFFENSIVE

Comme nous l'avons vu, une gestion durable des eaux implique la nécessité d'adapter la qualité de l'eau à son usage. Avant même d'envisager la potabilisation de l'eau, il est donc nécessaire de réfléchir au moyen de rendre l'eau de la citerne de qualité inoffensive, afin qu'elle puisse servir à tous les usages autres que la consommation.

Pour ce faire, il est utile de placer en amont de la pompe de relevage un filtre à sédiment de 25 microns alors qu'un second filtre de 10 microns sera placé en aval de celle-ci. De cette manière, il est possible d'ôter de l'eau les matières en suspension composées de fines particules de poussière, de micelles bactériennes et de fines particules de végétation (mousses, feuilles). L'eau ainsi traitée sera stockée dans un réservoir d'appoint, placé à l'intérieur de l'habitation.

EAU POTABLE

Concernant la production d'eau potable, les systèmes envisagés ici sont des systèmes alimentés au départ du réseau de distribution et qui desservent uniquement les points d'eau potable. Cela permet de ne disposer que d'un seul système de distribution et ainsi de faire des économies substantielles. Concrètement, le dispositif de potabilisation d'eau sera directement placé en aval d'un robinet poussoir consacré uniquement à la consommation de l'eau.



Figure 32: Robinet poussoir - arrivée d'eau potable (source : Orszàgh, 2012)

Lorsqu'on favorise les procédés physiques de potabilisation de l'eau, la qualité de départ de l'eau influence considérablement le bon fonctionnement du processus d'épuration, principalement en ce qui concerne les matières en suspension. En effet, les filtres utilisés sont de très faible porosité. Si l'eau n'a pas été préalablement filtrée des principaux solides en suspension, les filtres seront rapidement obturés et devront être plus régulièrement remplacés, entraînant un surcoût important pour le particulier. Au-delà de ces considérations économiques, les risques pour la santé sont également plus grands. Grâce au système décrit ci-dessus, les consommateurs peuvent être certains du bon fonctionnement du système de production d'eau potable (Orszàgh, 2012).

LA MICROFILTRATION, L'ULTRAFILTRATION ET L'ADSORPTION SUR CHARBONS ACTIFS

Ce système de production d'eau potable favorise l'utilisation de trois filtres, de porosité différente. L'eau traverse successivement un filtre à sédiment d'une porosité de 5 microns, un filtre céramique de porosité inférieure à 1 micron et un filtre à charbon actif (Orszàgh, 2012). Ce sont les étapes de microfiltration, d'ultrafiltration et d'adsorption (Gray, 2011). Chacun de ces filtres joue son propre rôle dans la potabilisation de l'eau.

La microfiltration a pour objectif premier de débarrasser l'eau des particules fines en suspension qui n'ont pas été retenues par le pré-filtre de 10 microns mis en place pour l'eau de qualité inoffensive. Elle filtre également une première partie des bactéries contenues dans l'eau. L'ultrafiltration, utilisant un filtre céramique d'une porosité souvent égale à 0,7 voire 0,4 microns, a pour but d'ôter les bactéries restantes ainsi que les virus, de taille inférieure aux bactéries (Orszàgh, 2012). Ce filtre se présente sous la forme d'un tube fermé que l'on peut ajuster directement à un robinet et est connu sous l'appellation « bougie Pasteur » (Morel et al., 1994 cité par Wandji Mbatchou, 2004). Contrairement aux systèmes chimiques, ils n'altèrent pas la qualité de l'eau. Cependant, pour rendre cette eau véritablement propre à la consommation, il est nécessaire de combiner cette étape à celle d'adsorption sur charbon actif (Orszàgh, 2012).

L'adsorption sur charbon actif est utilisée tant à l'échelle domestique qu'industrielle. En industrie, le charbon peut être introduit dans le système d'épuration à deux étapes distinctes : sous forme de poudre au moment de la floculation ou sous forme de grains durant la filtration (Gérard et al., 2011). A l'échelle domestique, seule cette deuxième alternative est utilisée. Son effet porte sur la matière organique dissoute dans l'eau (résidus d'hydrocarbures et de pesticides présents dans l'eau de pluie, détergents,...). L'adsorption permet également d'ôter les goûts liés au stockage de l'eau dans la citerne ainsi que les odeurs et la couleur éventuelle liées à la fermentation de boues dans cette citerne (Orszàgh, 2012). Plus précisément, les molécules solubles sont fixées à un substrat solide principalement par des forces de Van der Waals, mais aussi dans une moindre mesure par des forces chimiques et électriques. Pour être efficace, l'adsorbant doit avoir une surface spécifique très élevée, c'est pourquoi le charbon actif, avec une surface spécifique de 600 à 1500 m²/g, est souvent utilisé (Gray, 2011). Ce système ne fait généralement qu'un avec le système de filtration céramique dont il remplit les interstices. Il s'agit d'un système de filtration gravitaire qui, à cause de sa très faible porosité, peut entraîner une diminution significative du débit. En moyenne, il faudra donc compter 20 à 30 secondes pour remplir un verre d'eau de 2 dl. Ce système présente néanmoins l'avantage de ne pas consommer d'électricité supplémentaire.

Parallèlement, il est nécessaire de placer un compteur d'eau en amont du système d'épuration. Ce dernier ne peut en effet tolérer la production que de 20 000 à 25 000 litres d'eau potable à partir d'eau de pluie, après quoi le filtre céramique doit être remplacé. Entre-temps, celui-ci peut être nettoyé à l'eau de qualité inoffensive chaque fois que l'utilisateur constatera une diminution supplémentaire du débit. Le pré-filtre de 5 microns doit quant à lui être remplacé une fois par an (Orszàgh, 2012).

L'OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse est un procédé de filtration très fin qui permet la production d'une eau de haute qualité. L'utilisation d'un pré-filtre de 5 microns reste indispensable, de même que le filtre sur charbon actif. La filtration sur céramique est quant à elle remplacée par un système de filtration plus fine, de 0,1 à 1 nanomètre, capable de filtrer particules, bactéries, virus, composés organiques et ions (Orszàgh, 2012).

Ce système de filtration ne fonctionne pas tout-à-fait de la même manière qu'un filtre à céramique. Il s'agit d'une membrane semi-perméable dont la filtration est induite par une différence de pression de chaque côté de la membrane (Gray, 2011). Un tel système rejette 2 à 3 litres d'eau de rinçage par litre d'eau filtrée, qui sert à nettoyer la membrane et ainsi évacuer les impuretés retenues. Il est donc essentiel de veiller, malgré la complexification du réseau que cela peut entraîner, à rejeter cette eau dans la citerne afin qu'elle ne soit pas gaspillée (Orszàgh, 2012).

Le schéma suivant illustre de manière plus détaillée le fonctionnement de ce type de filtre.

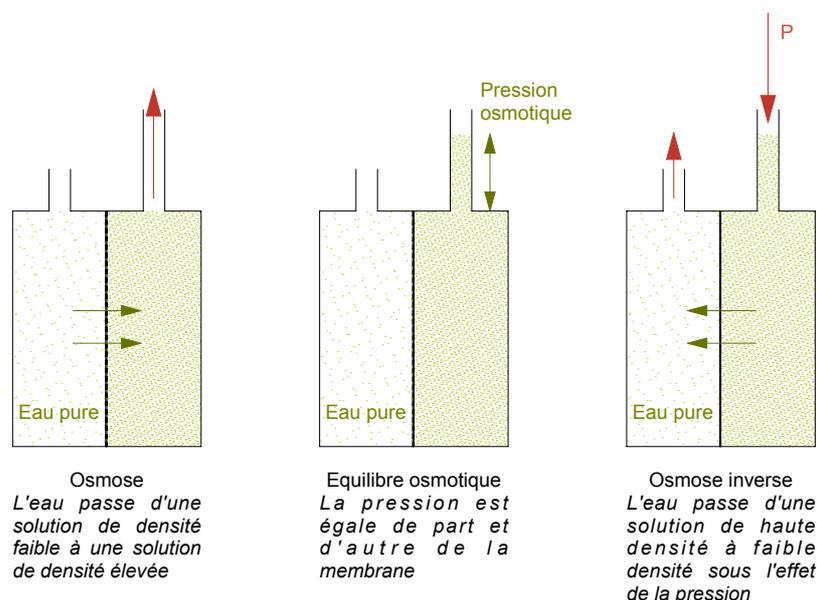


Figure 33: Principe de fonctionnement d'un osmoseur (réalisation : Monaco ; source : Gray, 2011)

Contrairement à l'ultrafiltration, l'osmose inverse modifie quelque peu la composition chimique de l'eau. Elle retient notamment une majeure partie des sels minéraux présents dans l'eau. La teneur après épuration est de l'ordre de 10 à 20 mg/l. Il sera donc laissé au consommateur le choix d'y adjoindre ou non des sels minéraux.

SYNTHESE DES PROCÉDES PHYSIQUES DE POTABILISATION

Afin de mieux comprendre le rôle des divers filtres utilisés dans les procédés physiques, le schéma suivant récapitule leur différente porosité et les éléments qu'ils retiennent.

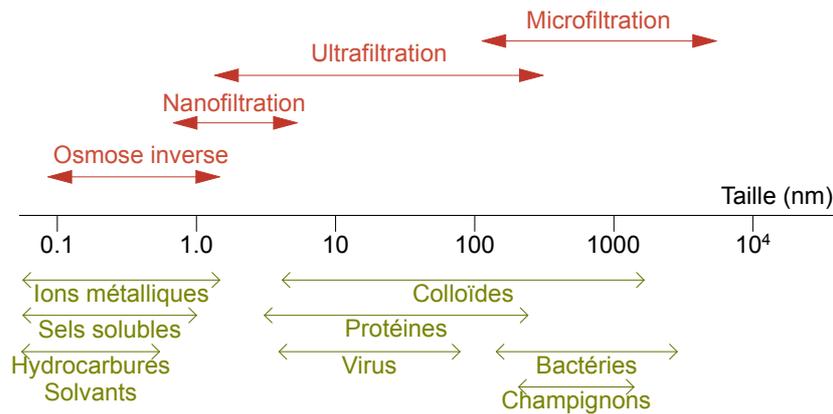


Figure 34: Récapitulatif de la porosité des filtres et taille des polluants de l'eau (réalisation : Monaco ; source : Gray, 2011)

L'osmose inverse présente un coût nettement plus élevé que l'ultrafiltration. Ce système ne doit être favorisé que lorsqu'il existe des risques de pollution de l'eau par des substances particulières. Ce système sera par exemple privilégié lorsque les matériaux utilisés entraînent des risques de pollution par des métaux lourds, ou encore si l'eau de pluie est chargée en sels marins (Orszagh, 2012).

Une eau filtrée par osmose inverse présentera donc des caractéristiques relativement différentes d'une eau filtrée par ultrafiltration et ne sera pas utilisée dans les mêmes cas de figure. Le tableau suivant synthétise les différences et similitudes entre les deux systèmes.

	Ultrafiltration	Osmose inverse
Domaine d'application	Eau chimiquement bonne mais qui contient des bactéries en trop grand nombre – eau de pluie, de puits, d'une source,...	Eau particulièrement polluée – Eau de pluie, eau de ville,...
Qualité microbiologique	Irréprochable	Irréprochable
Qualité physico-chimique	Ne modifie pas la composition minérale de l'eau	Elimine 85 à 95% des sels minéraux
Qualité organoleptique (goût)	50 mg/l de sels minéraux – goût d'une eau faiblement chargée en sels minéraux	10 à 20 mg/l – suffisant mais faible
Qualité médicale	Dépurative, légèrement diurétique	Dépurative, légèrement diurétique
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> › Nettoyage filtre à céramique t.l. 7 à 30 j › Remplacement annuel du pré-filtre › Remplacement du filtre à céramique après production de 25 m³ d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> › Entretien tous les 2 ans par le fournisseur. › Remplacement du pré-filtre et du charbon actif. › Remplacement de la membrane après 3 à 6 ans
Groupe hydrophore	Tous types	Réservoir tampon obligatoire
Eau rejetée	Rien	2 à 3 litres par litre d'eau filtrée
Dispositif particulier	Rien	Retour de l'eau de rinçage dans la citerne

Tableau 13: Comparaison entre ultrafiltration et osmose inverse (réalisation : Monaco ; source : Orszagh, 2012)

4.3.3.3 CHOIX RETENU

Suite à cette étude, il convient de choisir le système de potabilisation qui sera finalement mis en place dans l'habitation.

A priori, les procédés physiques s'inscrivent davantage dans la démarche de gestion durable, qui constitue l'un de nos objectifs majeurs. Il n'y a en principe pas de risques de pollution par des métaux lourds ou des sels marins, ce qui écarte la nécessité d'une épuration par osmose inverse, relativement onéreuse. L'ultrafiltration semble donc s'imposer comme le choix le plus judicieux.

L'avantage d'un tel système est qu'il ne consomme pas d'électricité, contrairement à une lampe à ultraviolets par exemple. L'ultrafiltration ne présente pas de risques pour la santé puisqu'il s'agit d'un procédé physique ne modifiant pas la composition chimique et biologique de l'eau, par opposition aux autres procédés envisagés. Il s'agit également d'un système peu contraignant puisque toutes les mesures sont prises afin d'éviter un colmatage prématuré des filtres. Ceux-ci présentent dès lors une longévité de plusieurs années.

En favorisant ce système, nous offrons aux habitants de la maison la possibilité de jouir d'une eau de bonne qualité, respectueuse de leur santé et de l'environnement tout en n'entraînant pas une consommation excessive d'électricité.

Il serait néanmoins opportun d'effectuer in situ des tests sur l'eau de pluie afin de s'assurer de sa qualité, auquel cas il faudrait peut-être favoriser l'utilisation d'un osmoseur. En effet, ce dernier répond également aux principaux objectifs fixés et pourrait être utilisé sans engendrer trop d'inconvénients secondaires significatifs.

4.3.4 LE GROUPE HYDROPHORE

Au système de traitement des eaux, il est nécessaire d'associer un système capable de distribuer dans l'habitation l'eau ainsi produite. C'est le rôle du groupe hydrophore, qui se compose majoritairement d'une pompe, d'un réservoir et de canalisations.

Plusieurs types de pompes peuvent être utilisés à l'échelle domestique, comme par exemple une pompe à piston ou une pompe centrifuge. Le choix s'effectue en fonction de divers paramètres : sa consommation énergétique, la présence ou non d'un système de sécurité à sec, le niveau sonore, la résistance à la corrosion des matériaux, la hauteur de succion, la puissance et finalement, la pression qu'elle est capable de fournir (de Herde D. & Trachte S., 2010).

L'ensemble de ces éléments doit être pris en compte mais, en ce qui nous concerne, c'est principalement la consommation énergétique en rapport avec la puissance de la pompe qui déterminera notre choix. Rappelons en effet que notre démarche dans le cadre de ce travail consiste à réduire les besoins énergétiques.

Dans une habitation unifamiliale à deux niveaux, il conviendra de choisir une pompe d'une puissance minimale de 350 Watts. Les pompes à piston sont efficaces, mais elles sont relativement coûteuses. Elles requièrent également l'emploi d'un réservoir d'appoint de grande capacité (environ 200 litres). Les pompes centrifuges sont moins onéreuses et fonctionnent également très bien. Elles peuvent être employées en combinaison avec un réservoir de grande capacité, mais si l'espace ne le permet pas, elles ont l'avantage de pouvoir être couplées avec des plus petits réservoirs (25 à 30 litres). Il existe actuellement des pompes fonctionnant sans réservoir d'appoint, qui se mettent en route dès l'ouverture d'un organe de distribution. Néanmoins, ces systèmes entraînent une sollicitation plus élevée de la pompe, s'accompagnant d'une réduction de sa durée de vie et de pics de consommation électrique. De manière générale, plus la capacité du réservoir d'appoint est

élevée, mieux la pompe sera rentabilisée du point de vue de sa consommation et de sa durée de vie. On favorisera donc l'emploi d'un réservoir d'appoint de capacité élevée, placé dans l'espace technique. Il est également intéressant que la pompe soit munie d'un contrôleur de débit et d'un système de sécurité à sec empêchant le fonctionnement de la pompe lorsque le réservoir est vide. Cela ne devrait, en principe, pas arriver fréquemment dans un habitat autonome, mais à nouveau, ce système permettra d'augmenter la durée de vie de l'appareil et d'éviter une consommation inutile en énergie (Orszàgh, 2012).

Quelques dispositions constructives doivent également être prises en compte afin d'assurer l'efficacité du pompage. La tuyauterie d'aspiration doit avoir une longueur inférieure à 25 mètres par dénivelé d'un mètre, et ne doit au total pas dépasser un dénivelé de 5 mètres (Deltau, 2004). Plus généralement, le réseau de distribution doit être aussi court que possible et limiter les embranchements et connexions. Il doit être accessible, facile de maintenance et, cela va de soi, ne pas altérer la qualité de l'eau (De Herde & Trachte, 2010).

Finalement, le schéma suivant récapitule les principaux éléments constitutifs du système d'épuration mis en place dans l'habitation.

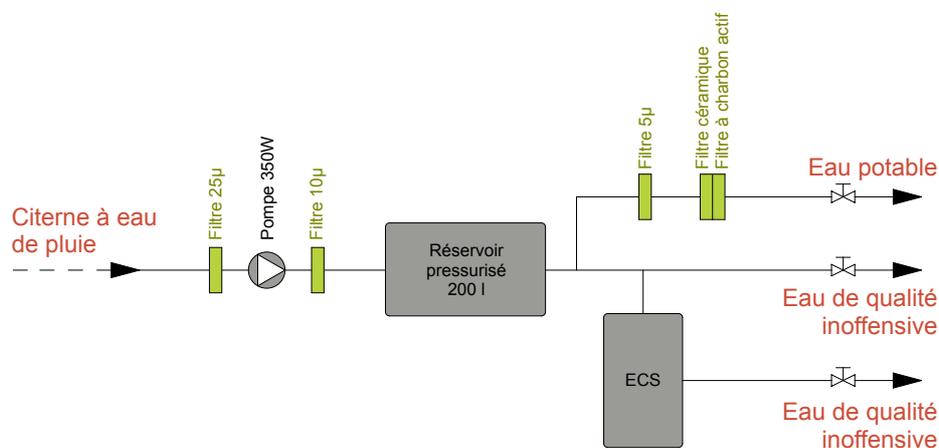


Figure 35: Schéma récapitulatif du système de traitement des eaux domestiques (réalisation : Monaco, 2012)

4.4 TRAITEMENT DES EAUX USEES

Après avoir traité le problème de l'alimentation en eau pour les besoins du ménage, nous devons maintenant nous intéresser à leur traitement avant rejet dans le milieu naturel. En effet, ne pouvant nous raccorder au système public d'assainissement collectif, il nous est obligatoire de prévoir un système individuel d'épuration. Nous ne pouvons prétendre nous inscrire dans une démarche durable de gestion de l'eau sans porter une réflexion approfondie sur cette problématique.

4.4.1 POLLUANTS DES EAUX USEES

Les eaux usées d'un ménage se décomposent en eaux de deux types, dont les caractéristiques chimiques et biologiques sont totalement différentes : les eaux grises et les eaux noires, ou eaux vannes.

Les eaux grises sont constituées des eaux usées issues de l'hygiène corporelle (bains et douches), de la machine à lessiver, du lave-vaisselle, de la cuisine et de l'entretien de la maison. Elles constituent la majorité des eaux usées d'un ménage, soit environ 50 à 80%.

Les eaux noires sont quant à elles exclusivement issues des eaux en provenance des toilettes.

Si la qualité des eaux noires est relativement constante, la qualité des eaux grises peut varier puisqu'elle dépend principalement des habitudes du ménage. Nombreux sont les polluants présents dans les eaux usées rejetées par une habitation. Selon qu'il s'agisse d'eaux vannes ou d'eaux grises, ceux-ci seront sensiblement différents. Mais au sein même des eaux grises, l'origine des principaux polluants dépend de l'application à laquelle l'eau s'est destinée (Li et al., 2008). Ces polluants peuvent être de nature chimique, biologique, visuelle ou même olfactive. Plus précisément, il s'agira principalement de pollution par les matières en suspension, par les matières organiques, par les substances chimiques et par les matières phosphatées et azotées (Cabrit-Leclerc, 2010). Il est essentiel de pouvoir les cibler et de comprendre comment les éliminer car elles peuvent avoir des conséquences désastreuses sur l'environnement, et poser de nombreux problèmes de santé publique (Rygaard et al., 2009).

4.4.1.1 LES DIFFERENTES SOURCES DE POLLUTION

POLLUTION PAR LES MATIERES EN SUSPENSION

L'ensemble des polluants des eaux usées est susceptible de se retrouver dans l'eau sous forme de matières en suspension. Il s'agit donc principalement de matières minérales et organiques. Une teneur élevée en matières en suspension dans les eaux superficielles provoque l'obscurcissement du milieu. La lumière y pénètre donc moins bien, entraînant une diminution de l'activité de photosynthèse. De plus, les matières en suspension contiennent des matières organiques qui, nous le verrons, favorisent le développement de micro-organismes aérobies, capables de provoquer un déséquilibre important des écosystèmes (Cabrit-Leclerc, 2010).

POLLUTION PAR LES SUBSTANCES CHIMIQUES

Les eaux usées domestiques contiennent également diverses substances chimiques pouvant s'avérer nocives. Ces dernières proviennent principalement des produits d'entretien utilisés pour la lessive, la vaisselle et le nettoyage ainsi que des médicaments ingérés et rejetés dans les excréta. Ces substances sont généralement peu biodégradables. Elles persistent dans l'environnement et s'accumulent dans les organismes vivants, provoquant des conséquences que l'on commence à peine à mesurer à ce jour.

Les détergents contiennent principalement deux composants nocifs que sont le phosphore et des agents lavants appelés tensio-actifs. Les effets néfastes du phosphore seront développés plus loin, dans la section concernant la pollution par les matières phosphorées.

Les agents tensio-actifs sont des éléments généralement peu biodégradables et qui réduisent dans les milieux naturels les échanges entre l'air et l'eau. Ils sont donc, au même titre que la plupart des polluants des eaux usées, particulièrement nocifs lorsqu'ils atteignent les eaux de surface. Il est important que les détergents que nous utilisons se dégradent relativement facilement et rapidement dans les milieux naturels. Pourtant, la réglementation européenne sur ce sujet reste timide puisqu'elle fixe le niveau de biodégradabilité à seulement 60% en 28 jours.

POLLUTION PAR LES MATIERES ORGANIQUES

La matière organique rejetée dans les eaux usées provient en majeure partie des eaux vannes mais également, dans une moindre mesure, des eaux issues de la cuisine (nettoyage des légumes notamment). Elles contiennent de nombreux micro-organismes qui peuvent s'avérer pathogènes. Les pollutions engendrées par ces matières organiques sont

problématiques car elles peuvent avoir des conséquences tant en matière de santé publique qu'en matière d'environnement, en perturbant les écosystèmes.

Ces micro-organismes peuvent être des bactéries (salmonelles, coliformes, streptocoques fécaux), des virus (hépatite A notamment), des parasites (Ténia), des champignons ou même des protozoaires (amibes). Ils utilisent la matière organique présente dans les eaux usées comme source de nutriment et, en absence d'oxygène et de lumière et grâce à l'humidité du milieu, y trouvent les conditions idéales pour proliférer.

Si ces eaux usées ne sont pas traitées avant leur rejet dans la nature, le risque de contamination des végétaux, insectes, poissons et autres animaux est élevé. L'homme se retrouve également exposé aux organismes pathogènes soit en ingérant une eau contaminée, soit par l'intermédiaire des aliments qu'il consomme, et encourt ainsi des risques d'infection. Les maladies hydriques les plus connues sont la gastro-entérite, le choléra ou encore la bilharziose. En n'assainissant pas ses eaux usées, l'homme s'expose à des risques d'épidémies de maladies infectieuses telles que rencontrées par le passé (Cabrit-Leclerc, 2010).

POLLUTION PAR LES MATIERES AZOTEES ET PHOSPHOREES

Les matières azotées et phosphorées sont issues de la décomposition des matières organiques que nous venons d'évoquer. Lors de l'assainissement de l'eau, ces éléments sont susceptibles de se transformer, sous l'effet de la bio-oxydation, en nitrates et phosphates capables de provoquer des dégâts bien particuliers sur les écosystèmes. A l'heure actuelle, ces éléments sont les principales causes de la pollution des eaux douces.

La transformation de l'azote en nitrates est très complexe et fait intervenir de nombreux organismes. Ils sont en fait le résultat de l'oxydation de l'azote ammoniacal, produit par la décomposition de bactéries à partir d'azote organique mis en contact avec les excréta.

Le phosphore peut se trouver dans nos eaux usées sous forme minérale ou organique. En moyenne, un individu rejette 4 grammes de phosphore par jour. Le phosphore organique provient des excréta et le phosphore minéral provient des détergents. Le phosphore minéral n'est pas un élément intrinsèquement toxique. Il est indispensable à la vie car l'essentiel des réactions cellulaires de l'homme l'utilisent. Néanmoins, cet élément est conservatif, ce qui signifie qu'il peut passer de l'état minéral à organique et inversement selon le pH du milieu et la quantité d'oxygène disponible (Cabrit-Leclerc, 2010).

Les nitrates et les phosphates sont des substances nutritives dont se nourrissent les algues pour leur croissance. Un apport exagéré de ces matières provoque une multiplication excessive d'algues au sein de l'écosystème. Ces algues consomment alors l'oxygène dissous dans l'eau, élément indispensable à la survie des poissons et autres organismes vivants. Les conditions de vie deviennent dès lors difficiles pour la faune et la flore du milieu aquatique qui s'asphyxie : c'est le phénomène d'eutrophisation. En aval du déversement d'une station d'épuration, on constate d'ailleurs systématiquement le phénomène d'eutrophisation dans l'eau de la rivière (Orszagh, 2012).

4.4.1.2 LA COMPOSITION DES EAUX GRISES ET DES EAUX NOIRES

Comme nous l'avons déjà mentionné, les eaux grises et les eaux noires, de par leur utilisation, présentent des caractéristiques totalement différentes.

Les eaux noires contiennent 98% de l'azote, 90% du phosphore et 99% des bactéries présentes dans les eaux usées d'un ménage. Elles sont donc à l'origine des principales pollutions des écosystèmes.

Les eaux grises ne contiennent quant à elles pratiquement aucune matière organique azotée (issue de l'urée, des protéines), de phosphore organique d'origine métabolique et mille à dix mille fois moins de bactéries de contamination fécale. On constate également une absence quasi totale de résidus de médicaments (oestrogènes, antibiotiques). Leur charge polluante est principalement composée de savons (issus de l'hygiène corporelle), de détergents (issus de la lessive, de la vaisselle, et de l'entretien) et de graisses (issues de la cuisine).

Le tableau suivant permet de comparer les caractéristiques des eaux grises à celles des eaux noires.

Caractéristiques	Eaux grises	Eaux noires
Origine	Entretien, cuisine, lessive, vaisselle, hygiène corporelle	Toilettes
Pollution par les MES ⁷	Elevée	Elevée
Pollution chimique	Ceux introduits pas les produits de vaisselle, lessive et d'entretien.	Résidus de médicaments, antibiotiques, molécules oestrogènes, produits biocides d'entretien des WC
Pollution organique	Bactéries pathogènes 1%	Bactéries pathogènes 98%
Pollution par l'azote et le phosphore	<ul style="list-style-type: none"> › 2% d'azote › 10 à 2% de phosphore (selon savons et détergents) – phosphore minéral › Un peu de soufre 	<ul style="list-style-type: none"> › 98% d'azote (5 kg/an.pers) › 90 à 98% de phosphore (1kg/an.pers) – phosphore organique
Température	Souvent chaudes ou tièdes	Toujours froides

Tableau 14: Comparaison entre les polluants des eaux grises et des eaux noires (réalisation : Monaco ; sources : Cabrit Leclerc, 2010 & Orszagh, 2012)

Il existe également un lien entre la valorisation de l'eau pluviale et la charge polluante des eaux grises. L'eau de pluie est une eau douce, pratiquement totalement exempte de calcaire, ce qui permet de réduire la quantité de détergents utilisés de 30 à 60% (Orszagh, 2012). De plus, il existe aujourd'hui sur le marché des détergents contenant des tensio-actifs naturels et exempts de phosphore. Ils sont tout aussi efficaces et ont un impact moindre sur l'environnement, notamment grâce à leur meilleure biodégradabilité. En France, le décret du 29 mars 2007 interdit les phosphates dans les lessives domestiques destinées au lavage du linge. Attention néanmoins, ce décret ne concerne que les lessives mises sur le marché à une date postérieure à celle du décret et n'est pas valable pour les lessives industrielles ou destinées au lave-vaisselle. Pour s'assurer du caractère écologique des produits utilisés en France, deux labels garantissent des produits sans dérivés pétrochimiques, sans Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) et sans matières premières animales. Il s'agit des labels Ecocert et Nature & Progrès (Cabrit-Leclerc, 2010).

Suites à ces quelques précautions, les eaux grises rejetées par un ménage sont finalement très peu polluées. La forte pollution des eaux vannes est, quant à elle, totalement inévitable. Selon Joseph Orszagh (2012), les eaux grises et les eaux vannes ont des caractéristiques chimiques et biologiques tellement différentes que le traitement sélectif des eaux usées devrait s'imposer de lui-même. Selon lui, le système de « tout à l'égout » est aussi absurde au point de vue scientifique que le système de « tout à la poubelle ». Il est donc essentiel d'envisager, en cas de dissociation des eaux usées, des méthodes d'épuration et de déversement adaptées aux caractéristiques de ces deux types d'eaux.

⁷ Matières en suspension

4.4.2 SYSTEMES D'EPURATION DES EAUX USEES

Il existe aujourd'hui une multitude de techniques permettant d'assainir, avec plus ou moins d'efficacité, les eaux usées rejetées par un ménage. Afin de mettre en place un système adapté aux spécificités des eaux à réintroduire dans le milieu naturel, il est essentiel, comme nous l'avons fait précédemment, de cibler leurs principales caractéristiques. Il est également nécessaire d'étudier les caractéristiques du site d'implantation de l'habitation. En outre, le système d'épuration proposé devra être conforme aux dispositions législatives en vigueur dans la région.

4.4.2.1 LES SYSTEMES D'EPURATION

L'épuration des eaux usées se caractérise par un traitement en trois phases : le prétraitement ou épuration primaire, l'épuration biologique ou secondaire et l'épuration tertiaire.

Généralement, le prétraitement consiste en l'introduction des eaux usées dans une fosse de décantation, un dégraisseur et/ou une fosse sceptique. L'épuration tertiaire consiste en l'utilisation d'une fosse de décantation secondaire avant le rejet des eaux dans le milieu naturel. L'épuration biologique, quant à elle, se divise en deux types distincts : les systèmes intensifs et les systèmes extensifs (Reiter, 2010). Ces deux familles possèdent chacune leurs propres avantages et inconvénients et seront mises en œuvre dans un contexte bien spécifique.

Epuration primaire	Epuration biologique		Epuration tertiaire
› Fosse de décantation › Dégraisseur › Fosse sceptique	Systèmes intensifs	Biodisques	› Fosse de décantation secondaire › Filtre
		Boues activées	
		Biomasse fixée	
	Systèmes extensifs	Filtres à roseaux	-
		Digesteur complanté	
		Lagunage	
		Tranchée filtrante + étang de finissage	

Tableau 15: Récapitulatif des dispositifs d'assainissement des eaux usées (réalisation : Monaco ; sources : Cabrit-Leclerc, 2010 ; Orszàgh, 2012 ; Reiter, 2010)

Les méthodes intensives traitent les eaux usées par oxygénation et intervention mécanique. Elles sont souvent appelées, dans le langage courant, « mini-stations d'épuration » et sont généralement mises en œuvre dans des contextes urbains où la place fait défaut (De Herde & Trachte, 2010). Trois systèmes principaux existent : les systèmes à biomasse fixée, à boues activées ou à biodisques (Reiter, 2010). Ils combinent les effets successifs d'une purification des polluants en milieu riche en oxygène et pauvre en oxygène. De manière générale, les méthodes intensives requièrent l'utilisation d'équipements tels que pompes et aérateurs. La demande en énergie est donc plus élevée pour un système intensif que pour un système extensif. Ils demandent également une maintenance plus élevée (De Herde & Trachte, 2010).

Dans le cadre de ce projet, compte tenu de l'espace facilement exploitable et du fait que nous cherchons à minimiser la consommation électrique, nous nous dirigerons naturellement vers les systèmes extensifs. Les systèmes intensifs ne seront pas davantage développés dans ce travail.

Généralement, un système de prétraitement de type fosse sceptique est préconisé. Le rôle principal de cette fosse est d'éviter le colmatage du système d'épuration biologique en débarrassant l'eau des particules en suspension et des graisses qu'elle contient. Les fosses sceptiques fonctionnent comme un système de fermentation spontanée anaérobie. En

pénétrant dans le réservoir, les bactéries vont provoquer, par fermentation, la liquéfaction des particules en suspension en boues qui vont se déposer au fond du réservoir. Après formation d'un dépôt de 10 centimètres, un état stationnaire va se créer de sorte qu'en principe, la fosse sceptique ne requerra pas un entretien fréquent. Les graisses, plus légères que l'eau, vont quant à elle former un chapeau flottant en surface. Celui-ci favorise les conditions anaérobies et, par là, le bon fonctionnement de la fosse sceptique. Par contre, ces graisses provoquent des émanations gazeuses de sulfure d'hydrogène qui doivent être évacuées. Une fosse sceptique doit donc toujours être équipée d'une aération (Cabrit-Leclerc, 2010).

La fosse sceptique doit être placée à moins de 10 mètres de l'habitation sans quoi le risque de colmatage des canalisations dû aux graisses et aux particules est trop important. Il faudrait alors placer un bac dégraisseur en amont du réservoir. Pourtant, ceci n'est pas recommandé pour le bon fonctionnement de la fosse. En effet, les eaux grises sont généralement tièdes ou chaudes. Or, cette élévation de température favorise le développement spontané d'une faune bactérienne capable de dégrader les polluants. On perdrait également l'avantage des conditions anaérobies créées par le chapeau flottant de graisses.

Des études ont montré une diminution de 60 à 80% de la charge polluante des eaux usées après un séjour de 18 jours dans la fosse sceptique. Les eaux qui en sortent sont toujours troubles mais il n'y a plus de risque de colmatage du dispositif de traitement (Orszàgh, 2012).

Plusieurs dispositifs de traitement extensifs peuvent alors être envisagés. L'avantage des systèmes extensifs est qu'ils sont généralement peu coûteux et demandent peu d'entretien, tout au plus la taille des plantes qui sont utilisées. Ils présentent également des avantages écologiques puisqu'ils favorisent le développement d'un écosystème et peuvent participer à la qualité du paysage (de Meester, 2009). Le site dans lequel s'implante l'habitation est un site naturel relativement aride, et la mise en œuvre d'un tel dispositif aurait des effets bénéfiques sur l'environnement, mais également pour le confort des habitants qui apprécieront l'effet visuel créé par un point d'eau.

Parmi les principaux dispositifs de traitement extensifs, citons notamment les filtres plantés de roseaux, les digesteurs complantés ou encore les lagunages (Cabrit-Leclerc, 2010).

LES FILTRES PLANTES DE ROSEAUX

Les roseaux ont un système racinaire extrêmement développé qui rend cette plante particulièrement intéressante pour l'épuration des eaux usées. Ses racines sont capables d'absorber l'eau et les sels minéraux contenus dans le sol. Au cours de ce processus, elles libèrent des glucides, enzymes et autres nutriments utilisables par les micro-organismes. Elles abritent donc une flore bactérienne aérobie importante se nourrissant des effluents et dégradant la matière organique. Ces micro-organismes vont notamment favoriser la minéralisation de l'azote et du phosphore, utiles à la croissance de la plante. Cette partie du massif où se concentre l'activité microbienne est appelée rhizosphère. Au-delà des réactions engendrées par les micro-organismes, la rhizosphère joue également un rôle de filtre physique des matières en suspension.

Les filtres plantés de roseaux peuvent être horizontaux ou verticaux et, selon les caractéristiques du site, étanches ou non.

L'inconvénient majeur des filtres plantés verticaux est la nécessité de phases de repos permettant l'apport d'oxygène, condition sine qua non au bon fonctionnement du système. Il faut donc favoriser le dédoublement des massifs et tuyauteries afin de pouvoir alterner l'usage.

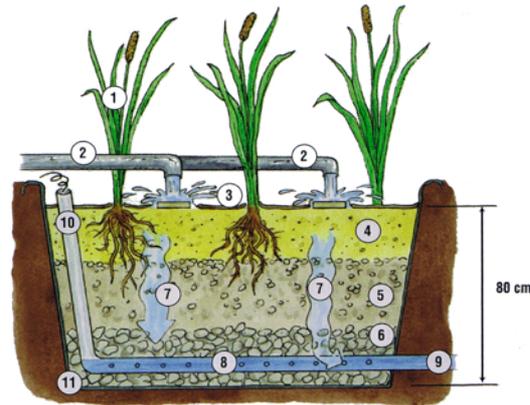


Figure 36: Filtre planté de roseaux vertical (source : Cabrit-Leclerc, 2010)

Les filtres horizontaux sont quant à eux saturés en eau. Ils favorisent des conditions anaérobies dans lesquelles le processus de dénitrification⁸ de l'azote peut s'opérer efficacement. Cependant, le processus de nitrification⁹ doit s'être déroulé au préalable. C'est pourquoi on combine généralement un filtre à roseaux vertical avec un filtre à roseaux horizontal, leurs effets se complétant (Cabrit-Leclerc, 2010).

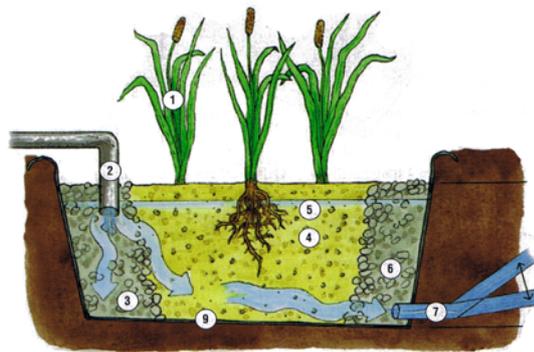


Figure 37: Filtre planté de roseaux horizontal (source : Cabrit-Leclerc, 2010)

LES DIGESTEURS COMPLANTES

Le digesteur se présente comme un fossé peu profond et étanche, installé en accordéon et rempli de galets et graviers de granulométrie décroissante (de 150 à 40 millimètres). Ces massifs sont plantés de végétaux d'espèces variées : scirpe, baldingère, papyrus, plantain aquatique, menthe, graminées,... Les graviers retiennent les particules en suspension tandis que les plantes, de la même manière que le roseau, consomment les éléments produits suite à la minéralisation des matières organiques par les micro-organismes retenus dans les racines. La longueur totale du système est calculée suivant la quantité d'eaux usées qui doit être évacuée.

Ce système présente l'avantage d'offrir une épuration complète, est compact et demande peu d'entretien. Par contre, il nécessite une pente douce et progressive et convient donc moins bien aux sites vallonnés (Cabrit-Leclerc, 2010).

⁸ Transformation aérobie microbienne du nitrate en azote gazeux.

⁹ Processus anaérobie d'oxydation de l'azote organique en nitrites puis en nitrates grâce à l'action de bactéries.

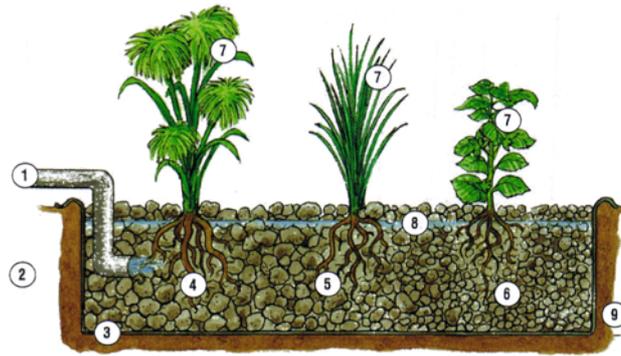


Figure 38: Digesteurs complantés - coupe schématique (source : Cabrit-Leclerc, 2010)

LES LAGUNAGES

Le lagunage consiste en la mise en série de plusieurs bassins, dans lesquels vont circuler les effluents. En surface, des bactéries aérobies se développent grâce à la matière organique contenue dans les effluents. L'activité de photosynthèse des végétaux développés en surface fournit l'oxygène nécessaire au développement des bactéries. Dans le fond, les boues décantées favorisent quant à elles les conditions anaérobies dans lesquelles se développent les bactéries du même nom.

L'appellation de lagunage regroupe en fait deux procédés distincts mais complémentaires : le lagunage à microphytes et le lagunage à macrophytes. Dans le premier, ce sont les phytoplanctons qui agissent sur les effluents, tandis que des plantes plus traditionnelles (iris, roseaux, joncs) agissent dans le second.

On constate que le lagunage est très performant en ce qui concerne la neutralisation du phosphore mais l'est moins en ce qui concerne les pollutions organiques et les matières en suspension. Il sera donc davantage efficace pour le traitement des eaux grises que pour celui des eaux noires. Ils occupent cependant une surface importante car le temps de séjour de l'eau dans les bassins doit être de 30 jours minimum (Cabrit-Leclerc, 2010).

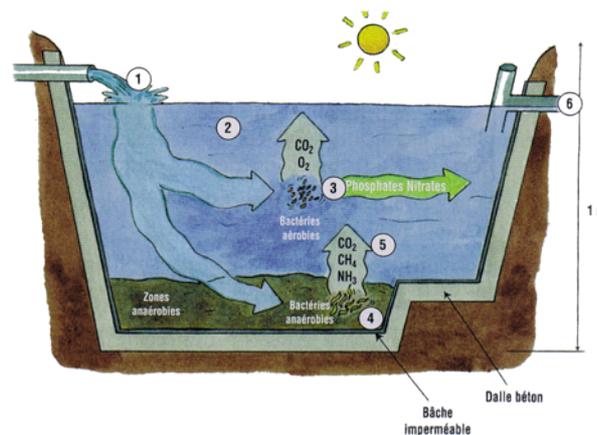


Figure 39: Lagunage - Principe épuratoire (source : Cabrit-Leclerc, 2010)

Au-delà de ces méthodes, il existe bien d'autres procédés d'épuration par les plantes. Par exemple, l'évapotranspiration par les bambous, la micro-irrigation paysagère et les taillis à très courte rotation fournissent également des résultats satisfaisants en matière d'épuration des eaux usées (Cabrit-Leclerc, 2010). Ces procédés sont cependant novateurs et nettement moins connus du grand public. Favoriser un système de ce type revient donc à

s'exposer à un refus des autorités françaises. Nous ne développerons pas ces dispositifs dans le cadre de ce travail.

PERTINENCE DES DISPOSITIFS D'ÉPURATION BIOLOGIQUE

Une notion essentielle à garder à l'esprit est que, grâce à l'utilisation de toilettes sèches, les eaux usées rejetées par le ménage sont uniquement constituées d'eaux grises. En outre, nous avons montré qu'en valorisant l'eau de pluie, une eau naturellement douce, la quantité de détergents utilisés pouvait être réduite de manière significative. Dans un souci de respect de l'environnement, nous pouvons également supposer que les habitants prendront garde à utiliser des détergents biodégradables et sans phosphore. Au final, ces eaux grises ne seront donc que très peu polluées. Or, les systèmes d'épuration traditionnels développés ci-dessus sont destinés, le plus souvent, à limiter la pollution engendrée par les eaux noires. Par contre, lorsqu'il s'agit d'eaux grises, les plantes ont pour seul objectif de neutraliser le phosphore contenu dans l'eau, phosphore dont sont exemptes nos eaux.

En définitive, est-il réellement nécessaire et rentable de mettre en œuvre un dispositif de traitement par les plantes ? Selon Joseph Orszagh (2012), la qualité de l'eau en sortie de fosse sceptique, dans le cas très particulier qui nous occupe, est telle qu'elle pourrait être infiltrée directement dans le sol au moyen d'un drain ou d'un puits perdant. En effet, les savons et détergents contenus dans les eaux grises sont des macromolécules organiques composées de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Ces molécules sont électriquement polaires et s'adsorbent facilement sur les particules du sol. La flore bactérienne les décompose ensuite en divers éléments qui, après réaction chimique, se transforment en ions de calcium présents dans la terre sous forme de sels peu solubles. Ces sels ont donc une probabilité très faible d'atteindre la nappe phréatique. De plus, après leur passage en fosse sceptique, une partie de ces macromolécules a déjà été neutralisée (Tanguay, 1990 cité par Orszagh, 2012).

En conclusion, il semble peu pertinent, dans le cas présent, de développer un système d'épuration biologique par les plantes.

4.4.2.2 LA LEGISLATION EN MATIERE D'ASSAINISSEMENT INDIVIDUEL DES EAUX USEES

En France, en matière d'assainissement collectif, les communes sont soumises à des exigences en terme de niveau de traitement, dépendant de la taille de l'agglomération et de la sensibilité du milieu récepteur. La qualité des eaux épurées en sortie du dispositif de traitement est donc définie : on impose aux stations d'épuration une obligation de résultats.

Paradoxalement, c'est une obligation de moyens qui régit l'assainissement individuel. L'Arrêté du 7 septembre 2009 fixe les prescriptions techniques applicables. Les installations autonomes doivent être conçues de manière à « ne pas porter atteinte à la salubrité publique, à la qualité du milieu récepteur ni à la sécurité des personnes. Elles ne doivent pas présenter de risques pour la santé publique et ne doivent pas favoriser le développement de gîtes à moustiques, ni engendrer une nuisance olfactive. De plus, tout dispositif de l'installation accessible en surface doit être conçu de façon à assurer la sécurité des personnes et éviter tout contact accidentel avec les eaux usées. » (Cabrit-Leclerc, 2010).

En outre, l'Arrêté du 6 mai 1996 nous apprend que les systèmes d'assainissement individuels préconisés sont constitués d'une fosse sceptique toutes eaux et d'un épandage dans le sol en place ou sur sol reconstitué. Les puits perdants sont interdits, y compris pour les habitations existantes, car ils sont jugés trop dangereux pour la qualité de la nappe. Les caractéristiques techniques et le dimensionnement des dispositifs individuels doivent être adaptés aux caractéristiques du lieu où ils sont implantés : pédologie (nature du sol), hydrogéologie (eaux souterraines) et hydrologie (eaux de surface). Le lieu d'implantation

tient compte des caractéristiques du terrain, de sa nature, de la pente et de l'emplacement du bâtiment (Conseil Général de la Drôme, 2006).

Depuis le 31 décembre 2005, les communes contrôlent les systèmes d'assainissement individuels par le biais du Service Public d'Assainissement Non Collectif (SPANC) qui vérifie le bon fonctionnement et la conformité des installations. Les chiffres relevés par l'organisme sont alarmants : de nombreuses installations ne sont pas conformes et polluent les ressources aquifères (Cabrit-Leclerc, 2010).

Il va de soi qu'au-delà des aspects techniques, ces considérations sont susceptibles d'influencer le choix final retenu pour l'épuration des eaux usées.

4.4.2.3 SOLUTION RETENUE

Suite à ces éclaircissements concernant la législation en vigueur en France en matière d'assainissement individuel, il apparaît qu'il est interdit de rejeter, comme évoqué, les eaux grises dans le milieu récepteur directement après le passage dans la fosse sceptique. Les puits perdants sont en effet prohibés dans la région, victimes d'à-priori concernant le danger que ces dispositifs représentent pour l'environnement. Dans ce cas de figure, il est possible de compléter l'épuration au moyen de deux étapes additionnelles : la tranchée végétale filtrante et le bassin de finissage.

La tranchée végétale filtrante est un système de filtration physique des matières en suspension au moyen d'une simple tranchée étanche creusée dans le sol et remplie de plantes et d'un substrat sableux. Dans l'étang de finissage, c'est le rayonnement ultraviolet qui permettra la coagulation et la décantation de la charge polluante nécessaire. Forts de ces quelques précautions, le dispositif mis en œuvre devrait satisfaire aux exigences du SPANC.

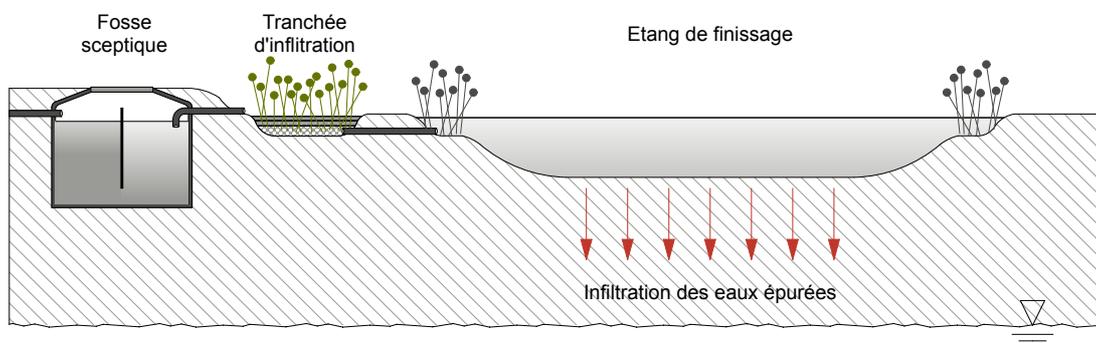


Figure 40: Système d'assainissement des eaux usées (réalisation : Monaco, 2012)

L'inconvénient de ce système est qu'il augmente légèrement les pertes par évaporation. Une quantité moindre d'eau retourne à la nappe par rapport à un puisard. Par contre, il met en œuvre un point d'eau dont pourront profiter les habitants. L'expérience a montré que l'eau contenue dans ce bassin est de qualité inoffensive, il n'y a donc aucun risque pour la santé de l'individu. Il est également possible d'y mettre des poissons s'il est suffisamment profond. Cependant, il faut alors placer un aérateur d'étang, dispositif qui consommera de l'électricité et que nous éviterons ici (Orszagh, 2012). Un tel système permet de favoriser un dispositif gravitaire. Il sera possible de tirer profit de la pente naturelle du terrain tout en faisant l'économie d'une pompe. Le système proposé répond finalement aux objectifs principaux qui guident notre réflexion depuis les prémices de ce travail.

4.5 ELABORATION D'UNE STRATEGIE ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS

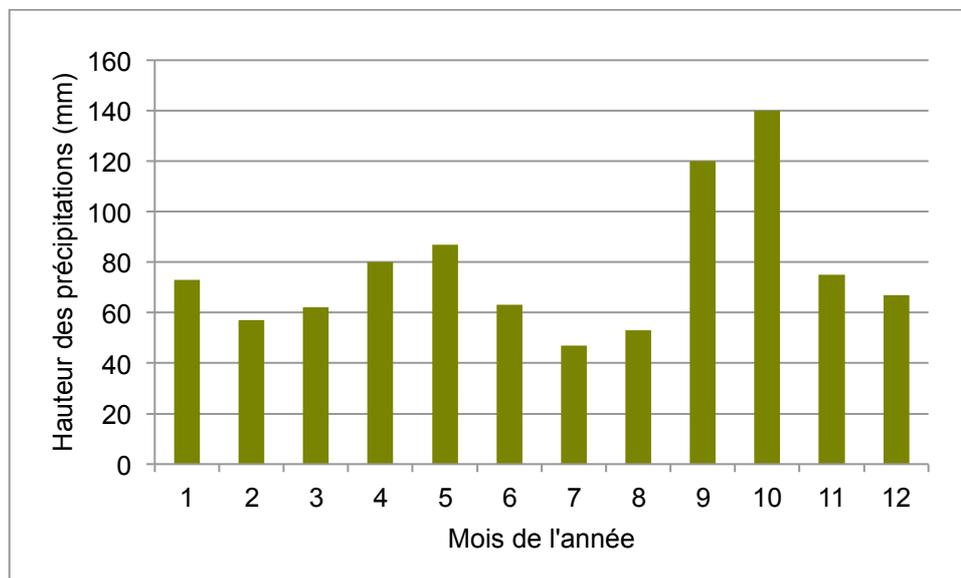
4.5.1 DIMENSIONNEMENT DE LA CITERNE A EAU DE PLUIE

Au début de ce chapitre, nous avons marqué notre souhait de récolter l'eau de pluie en priorité pour élaborer notre stratégie de l'eau. Nous devons désormais évaluer le pourcentage des besoins en eau du ménage que cette eau de pluie va pouvoir couvrir. En fonction du résultat obtenu, il pourrait s'avérer nécessaire d'envisager une ou plusieurs solutions secondaires, capables de compléter les apports en eau de pluie, afin que l'habitation soit totalement autonome en eau.

ANALYSE DES PRECIPITATIONS

Grâce à Météo France, nous disposons du diagramme des précipitations moyennes mensuelles de la ville de Montélimar, située au sud de la Commune de Grâne mais dans la même zone climatique.

Dans un premier temps, nous apprenons que les précipitations moyennes annuelles, de 924 millimètres par mètre carré par an, sont relativement élevées par comparaison aux 850 millimètres récoltés en Belgique. Par contre, la région française ne compte que 80 jours dont les précipitations sont supérieures à 0,1 millimètre par mètre carré, contre 200 jours pour la Belgique. (meteofrance.com & météo.be, 2012). Cela signifie que les précipitations sont moins bien réparties sur la commune de Grâne. Il faudra évidemment en tenir compte lors du dimensionnement de la citerne à eau de pluie.



Graphique 7: Précipitations moyennes mensuelles à Montélimar (Rhône-Alpes, France) (réalisation : Monaco, source : meteofrance.com, 2012)

Nous observons sur le graphique qu'à la sortie de l'été, de fortes pluies s'abattent sur la région durant deux mois (septembre et octobre). Nous constatons également qu'en février et mars, les précipitations deviennent pratiquement égales à celles de juillet et août, les mois les plus secs.

COLLECTE DE L'EAU DE PLUIE

La formule permettant de déterminer l'eau de pluie collectée par une surface est la suivante :

$$EC = R \times A \times (1 - C)$$

Avec EC : la quantité d'eau récoltée (mm/ mois)

R : les précipitations moyennes mensuelles (mm/m².mois)

A : la surface de collecte (m²)

C : le coefficient de pertes dues à l'évaporation, aux saletés et aux filtres (%)

Grâce au pluviogramme présenté, nous connaissons les précipitations moyennes mensuelles R.

La surface de collecte A est déterminée par la surface de la toiture projetée horizontalement. Autrement dit, il s'agit de la surface brute de l'habitation augmentée d'éventuels débords de toiture. La surface de collecte de notre habitation est de 180 m².

Il reste à déterminer le coefficient de pertes C. Des valeurs totalement différentes sont rencontrées dans la littérature :

10% (Orszagh, 2012 - Belgique)

25% (Vanderstadt, 2011 - Belgique)

20% (Abdulla & Al-Shareef, 2008 - Jordanie)

25% (Deltau, 2004 - France)

10% (Vu, 2006 – France)

Il ne semble pas y avoir de réelle logique dans l'élaboration de ces valeurs. Par exemple, elles ne sont pas identiques pour un même pays. De plus, les auteurs sont rarement clairs quant aux véritables paramètres pris en compte dans leur évaluation. S'agit-il uniquement des pertes par évaporation ou tiennent-ils également compte des pertes dans les filtres ? Les filtres considérés sont-ils des filtres autonettoyants (dans lesquels le taux de perte est plus élevé) ou des filtres classiques ?

Les coefficients de 25% paraissent énormes. Perdre un quart des précipitations totales uniquement à cause des filtres et de l'évaporation semble peu plausible. Il n'est cependant pas dans notre intérêt de trop sous-estimer ce coefficient de pertes. En effet, cela reviendrait à surestimer la quantité d'eau récoltée et ainsi le niveau d'autonomie attendu. Nous décidons donc de considérer la moyenne arithmétique des valeurs fournies :

$$C = \frac{10 + 25 + 20 + 25 + 10}{500} = 18\%$$

Cette valeur de 18% nous paraît suffisamment sécuritaire. Nous pouvons désormais calculer la quantité d'eau de pluie récoltée chaque mois grâce à la toiture de l'habitation. Cette valeur devra être comparée aux besoins mensuels en eau du ménage.

Mois	Quantité d'eau récoltée (litres)
Janvier	10775
Février	8413
Mars	9151
Avril	11808
Mai	12841
Juin	9298
Juillet	6937
Août	7823
Septembre	17712
Octobre	20664
Novembre	11070
Décembre	9889
Total	136 382

Tableau 16: Eau de pluie récoltée chaque mois par la toiture de l'habitation (réalisation : Monaco, 2012)

Il est à noter qu'avec un coefficient de perte de 25%, coefficient de pertes maximal fourni dans la littérature, seuls 124 740 litres seraient récoltés sur l'année, à savoir 8% de moins. Dans ces conditions, il est probable que les choix retenus ci-dessous doivent être adaptés.

BESOINS EN EAU DU MENAGE

Nous avons précédemment montré (cf. 4.3.2.4 *Bilan final des consommations*) que la quantité d'eau moyenne consommée de manière journalière par un individu d'un ménage économe français utilisant des toilettes sèches était d'environ 59 l/j.hab. La famille des propriétaires se compose de 5 individus mais la maison peut accueillir jusqu'à 8 personnes. Nous ferons donc l'hypothèse que 6 personnes vivent en permanence dans l'habitation. De plus, nous considérerons par facilité que tous les mois de l'année comportent 31 jours.

Les besoins mensuels en eau du ménage se calculent grâce à la formule suivante :

$$BM = CJ \times I \times N$$

Avec BM : les besoins mensuels en eau du ménage (litres/mois)

CJ : la consommation moyenne journalière d'un individu du ménage (l/j.hab)

I : le nombre d'individus composant le ménage

N : le nombre de jours dans un mois de l'année

Nous obtenons ainsi des besoins mensuels de :

$$BM = 59 \times 6 \times 31 = 10\,974 \text{ l/mois} \approx 11 \text{ m}^3$$

A titre comparatif, un ménage français moyen consomme :

$$BM = 140 \times 6 \times 31 = 26\,040 \text{ l/mois} \approx 26 \text{ m}^3!$$

COUVERTURE DES BESOINS GRACE A L'EAU DE PLUIE

Nous sommes maintenant en mesure de comparer ces besoins à la quantité d'eau récoltée chaque mois par la toiture de l'habitation. En l'absence de citerne, nous constatons que les précipitations nettes récoltées ne peuvent subvenir aux besoins du ménage que 5 mois par an ! En pratique, l'eau excédentaire qui n'aura pas été consommée durant un mois se reportera au mois suivant grâce à la citerne. Si nous faisons momentanément l'hypothèse

d'un réservoir de volume illimité, en commençant le calcul à partir d'une citerne vide au mois de septembre (à la sortie de l'été), nous obtenons la répartition suivante :

Mois	Quantité d'eau récoltée (litres)	Quantité retirée (litres)	Eau résiduelle dans la citerne (litres)
Septembre	17712	10974	+ 6738
Octobre	20664	10974	+16428
Novembre	11070	10974	+16524
Décembre	9889	10974	+15439
Janvier	10775	10974	+15240
Février	8413	10974	+12679
Mars	9151	10974	+10856
Avril	11808	10974	+11690
Mai	12841	10974	+13558
Juin	9298	10974	+11882
Juillet	6937	10974	+7846
Août	7823	10974	+4694
Total	136382	131688	

Tableau 17: Répartition des précipitations dans la citerne pour subvenir aux besoins du ménage (réalisation : Monaco, 2012)

Le tableau précédent demande quelques explications complémentaires. Chaque mois, 11 m³ d'eau devront être prélevés dans la citerne pour les besoins du ménage. En reportant de mois en mois l'eau récoltée excédentaire (i.e. qui n'aura pas été utilisée par le ménage et restera donc dans la citerne), nous montrons qu'il est possible de subvenir aux besoins du ménage toute l'année. Nous observons également que, à la fin du mois d'août, un excédent de 4694 litres pourra venir s'ajouter aux précipitations du mois de septembre.

Globalement, le ménage consommera 131 688 litres par an tandis que 136 382 litres seront récoltés (en partant de l'hypothèse d'une citerne vide en septembre ce qui, nous venons de le voir, n'est pas totalement vrai). Il est donc possible, grâce au contexte climatique, de couvrir l'entièreté des besoins du ménage uniquement grâce à l'eau de pluie récoltée par la toiture. Cette affirmation n'est cependant vraie que si la citerne est dimensionnée afin de récolter l'ensemble des précipitations arrivant sur la toiture. Nous allons désormais nous intéresser au dimensionnement de cette citerne.

DIMENSIONNEMENT DE LA CITERNE

FORMULE EMPIRIQUE

Lors du dimensionnement de la citerne, il est essentiel de tenir compte de l'imprévisibilité des précipitations. Il se peut en effet qu'une grande quantité d'eau tombe en quelques heures et la citerne doit être de capacité suffisante pour recueillir cette eau. Inversement, il arrive qu'exceptionnellement, il ne pleuve pas durant une longue période.

Les statistiques des services météorologiques français montrent que les périodes de sécheresse dépassent rarement 21 jours (Deltau, 2004). L'auteur propose donc de déterminer la capacité du réservoir de telle sorte qu'une période de sécheresse de 21 jours puisse être compensée. Il fournit la règle empirique suivante :

$$V_r = BA \times \left(\frac{21}{365} \right)$$

Avec V_r : le volume du réservoir (m³)

BA : les besoins annuels en eau du ménage (m³)

Dans notre cas, cette formule fournit un volume de 7,6 m³ pour le réservoir. Cette valeur est très largement sous-estimée puisqu'elle ne permet même pas de combler les besoins mensuels du ménage. Les citernes utilisées dans les maisons autonomes en eau ont généralement une capacité de plusieurs dizaines de mètres cubes (Orszàgh, 2012). Cette importante différence est probablement due au fait que la formule ci-dessus résulte de la rentabilité économique du système.

SCENARIO CRITIQUE

De ce fait, nous allons établir notre propre scénario pour le dimensionnement de la citerne à eau de pluie. En observant dans le tableau précédent la répartition mensuelle de l'eau de pluie récoltée, nous remarquons que le scénario critique consisterait à considérer qu'à la sortie du mois d'octobre, moment auquel la citerne est déjà remplie d'une quantité résiduelle importante d'eau, l'ensemble des précipitations du mois de novembre tomberait en une seule fois, sans déduire la consommation en eau du ménage. A aucun autre moment de l'année la citerne ne sera aussi remplie. On obtient ainsi la capacité que doit avoir le réservoir :

$$V_r = (\text{Report d'octobre}) + (\text{Eau récoltée en novembre}) = 16\,428 + 11\,070 \\ = 27\,498 \text{ litres soit } 27,5 \text{ m}^3$$

Ce résultat semble déjà plus plausible. D'après Joseph Orszàgh, il faut compter, pour une maison autonome en eau, une capacité de 15 m³ par surface de récolte de 100 m². Cette approximation fournit dans notre cas (surface de 180 m² de toiture) une capacité de réservoir de 27 m³. Cette valeur tend à valider le scénario critique proposé.

PERIODE DE SECHERESSE

Il reste à vérifier que la capacité de la citerne est telle qu'une période de sécheresse de 21 jours ne nuira pas au bon fonctionnement du ménage. Les risques de sécheresse sont les plus élevés durant les moins les plus chauds et les moins pluvieux, à savoir juillet et août. Nous considérerons que la période de sécheresse survient les trois premières semaines du mois car à ce moment, nous connaissons la quantité d'eau excédentaire encore présente dans la citerne.

Si la sécheresse intervient en juillet, cela n'entraîne pas de conséquences importantes sur le cycle établi de répartition des eaux récoltées. L'eau résiduelle présente dans la citerne à ce moment de l'année est telle qu'elle peut pallier à une sécheresse au mois de juillet et au déficit moyen habituel au mois d'août.

En août par contre, la quantité d'eau résiduelle dans la citerne a déjà été fortement réduite par le déficit moyen habituel du mois de juillet, et la citerne risque donc d'être mise à sec. Pour éviter cela, nous allons légèrement surdimensionner le réservoir. En effet, nous savons qu'il n'est pas tout-à-fait réel de considérer une citerne vide au début du mois de septembre, puisqu'après une année complète de précipitations, pour une année sans sécheresse, il devrait y avoir environ 4600 litres d'eau excédentaire. Or, nous avons jusqu'ici réalisé nos calculs sans tenir compte de cet excédant. En arrondissant la capacité de la citerne à 30 m³, il pourra être récolté et permettre de pallier à une période de sécheresse survenue durant la période la plus critique (au mois d'août).

En cas de sécheresse prolongée par contre, d'autres mesures devront inévitablement être mises en œuvre. Les propriétaires pourraient par exemple être contraints de laver leur linge dans un lavoir plutôt qu'à domicile. Cela permettrait d'économiser jusqu'à 2232 litres sur un mois, eau qui pourrait être consacrée à d'autres applications.

4.5.2 DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USEES

DIMENSIONNEMENT DE LA FOSSE SCEPTIQUE

Certains manuels proposent de dimensionner la fosse sceptique selon la taille de l'habitation. Il faudrait ainsi compter un volume de 3 m³ pour une habitation de 5 pièces et ajouter 1 m³ par pièce supplémentaire (Cabrit-Leclerc, 2010). Cependant, cette méthode semble assez empirique et ne précise pas s'il faut considérer toutes les pièces de la maison (pièces techniques comprises) ou seules les pièces principales. Nous préférons donc utiliser la formule proposée par M. Orszàgh :

$$V_{fs} = V_{eg} \times C$$

Avec V_{fs} : le volume de la fosse sceptique (m³)

V_{eg} : le volume d'eaux grises produites par le ménage en une journée (m³/jour)

C : le coefficient tenant compte du temps de séjour dans la fosse sceptique. Il doit être pris entre 15 et 20.

Nous considérerons un coefficient C de 20 jours alors que 354 litres d'eaux usées sont produites par jour par le ménage. Il nous faudra donc placer une fosse sceptique d'une capacité de 7 m³.

DIMENSIONNEMENT DE LA TRANCHEE FILTRANTE ET DE L'ETANG DE FINISSAGE

Contrairement à l'étang de finissage, la tranchée filtrante n'est conçue pour recevoir les eaux usées que durant une période limitée. On compte donc habituellement une superficie relativement faible d'environ 1 m²/personne, avec une profondeur de 40 centimètres et une largeur de 80 centimètres (Orszàgh, 2012). La tranchée filtrante à mettre en œuvre pour un ménage de six personnes occupera donc une surface de 6 m².

L'étang de finissage doit être suffisamment grand pour accueillir l'ensemble des eaux usées du ménage, mais ne doit pas être trop surdimensionné au risque d'être asséché en été, provoquant la mort de toute la faune et la flore du bassin et, par là, le dysfonctionnement du dispositif d'épuration. En moyenne, il faut compter 1,5 à 2 m³/personne (Orszàgh, 2012). Pour une famille de six personnes, l'étang de finissage aura donc une capacité d'environ 10 m³. Comme le bassin ne contiendra pas de poissons, il n'y a pas de limites de profondeur. Nous la choisirons égale à environ un mètre.

4.6 SOLUTIONS ALTERNATIVES

Grâce aux caractéristiques du site que nous avons étudié, nous avons vu qu'il est envisageable de subvenir aux besoins du ménage uniquement grâce à la récolte et au traitement de l'eau de pluie. Dans un souci de complétude, il est important d'aborder – sans toutefois les développer avec le même niveau de détail – les solutions alternatives qui auraient pu être adoptées si la quantité d'eau de pluie récoltée n'avait pas été suffisante.

Nous sommes en effet partis du principe que, dans le cas d'une habitation autonome, le premier réflexe à adopter est la récolte des eaux pluviales. Celles-ci sont gratuites, disponibles (en quantité variable) pour tous et leur récolte ne requiert pas un équipement important. Mais dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de développer un système secondaire capable de pallier au manque d'eau. Ce sont ces systèmes secondaires que nous nous proposons d'aborder maintenant.

4.6.1 COLLECTE PAR UN PUIT

Anciennement, la majorité de nos ancêtres disposaient de leur propre puits et étaient ainsi autonomes en eau. Ceux-ci ont ensuite été totalement abandonnés avec le développement des réseaux publics de distribution d'eau. Les puits constituent pourtant une alternative intéressante lorsque l'on désire être indépendant des réseaux publics de distribution. Selon Hugo Vanderstadt (2011), il existe deux moyens principaux pour valoriser l'eau d'un puits en complément à l'eau pluviale : le système à deux circuits de distribution et le système à un seul circuit de distribution.

Le premier système favorise la différenciation de la qualité de l'eau en fonction de l'usage. Selon M. Vanderstadt (2011), l'eau de pluie devrait être utilisée pour les toilettes (si elles n'ont pas été remplacées par une TLB), la machine à lessiver, l'entretien et l'arrosage du jardin. L'eau du puits, supposée de meilleure qualité, devrait quant à elle être utilisée pour la consommation, la cuisine, le nettoyage du linge et l'hygiène corporelle. L'inconvénient indéniable d'un tel système est qu'il dédouble l'ensemble des canalisations et le groupe hydrophore. Il faudrait dès lors disposer d'un premier groupe hydrophore destiné au traitement et à la distribution de l'eau de pluie, et d'un second groupe réservé à la distribution et au traitement de l'eau du puits. Supposant que l'eau du puits est plus pure que l'eau pluviale, cela permettrait néanmoins de faire l'économie d'un système de filtration complexe. Dans un tel système, l'eau de pluie n'est pas totalement exploitée et il est indispensable, afin de demeurer dans une logique cohérente, de veiller à l'infiltration de l'eau pluviale dans le sol.

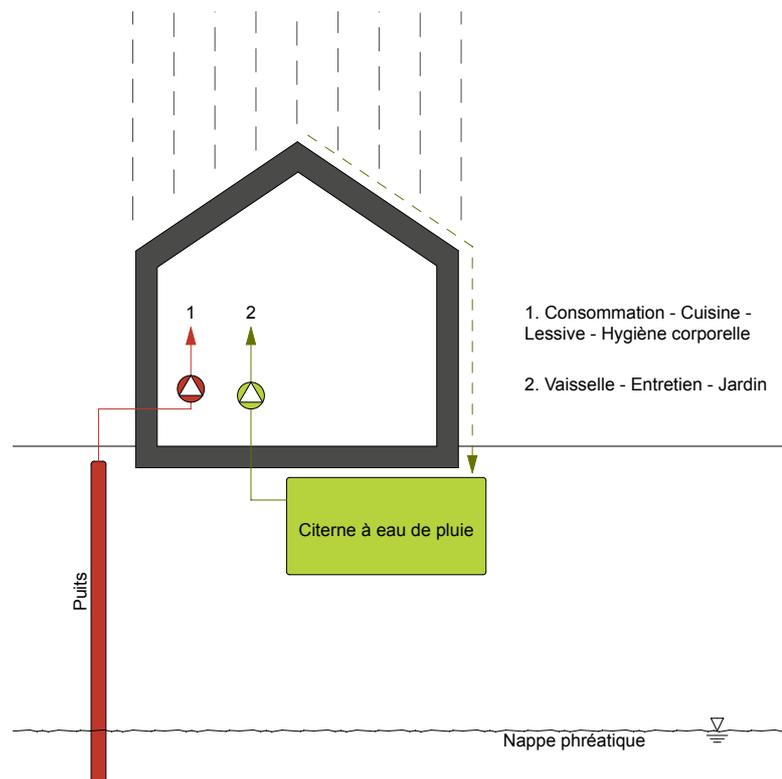


Figure 41: Système à double circuit de distribution (réalisation : Monaco ; source : Vanderstadt, 2011)

La deuxième solution proposée par l'auteur consiste à utiliser l'eau du puits uniquement pour pallier à la carence en eau de pluie. Le système mis en place dans l'habitation serait dès lors le même que celui adopté jusqu'alors, sauf que l'eau serait puisée dans la nappe phréatique au moyen d'une pompe seulement lorsque cela deviendrait nécessaire. Un capteur placé au fond de la citerne activerait la pompe du puits afin de réapprovisionner le réservoir. Ce

système entraîne la nécessité d'utiliser une seconde pompe mais peut, en cas de période de sécheresse importante, s'avérer extrêmement utile.

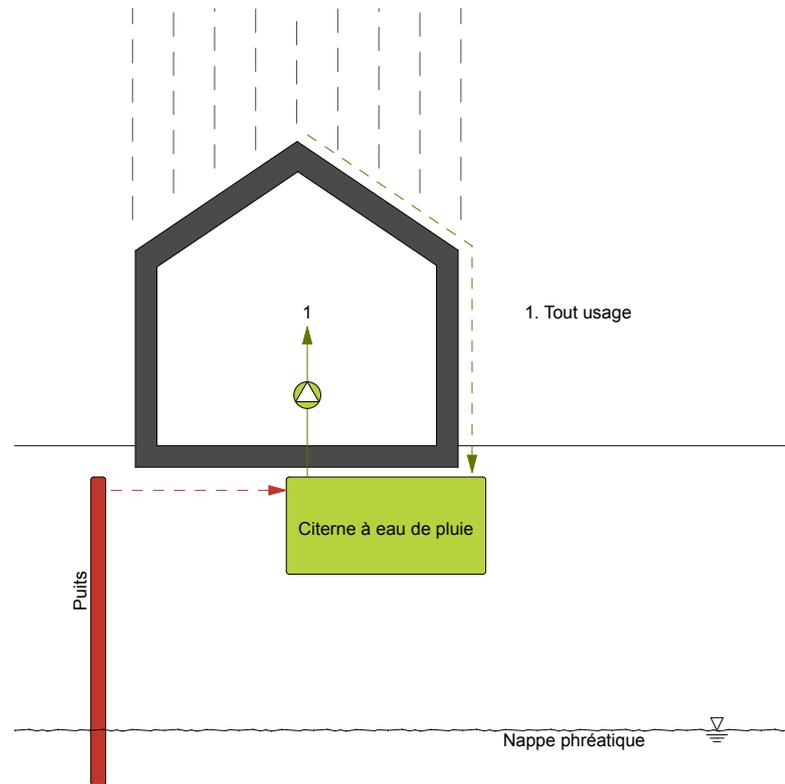


Figure 42: Système à simple circuit de distribution (réalisation : Monaco ; source : Vanderstadt, 2011)

Pour utiliser l'une de ces alternatives, il est néanmoins indispensable de disposer d'eaux souterraines à proximité du site d'implantation, ce qui n'est pas une généralité. De plus, les systèmes de puisage peuvent s'avérer extrêmement coûteux, le prix augmentant avec la profondeur du puits. Il faut également s'assurer, en cas de présence d'eau, de sa qualité. Les nappes phréatiques peuvent parfois être polluées et impropres à la consommation. Pour le savoir, il est nécessaire de consulter un expert qui réalisera des tests in situ.

Notre cas d'étude se situe à proximité d'un fleuve, la Drôme. Malgré le fait que cette portion du cours d'eau est à proximité d'un site naturel protégé, le schéma général d'assainissement de la commune de Grâne (2006) nous apprend que cette eau est de qualité médiocre. De plus, l'habitation culmine à 270 mètres d'altitude alors que le fleuve n'est qu'à 126 mètres d'altitude. Cela signifie qu'il faudrait probablement réaliser un puits de très grande profondeur afin de rejoindre la nappe. Nous ne connaissons pas, en outre, la composition pédologique du site. Avec les informations dont nous disposons, nous ne pouvons dès lors nous prononcer sur la faisabilité ou non de cette méthode dans le cadre de ce projet.

4.6.2 REUTILISATION DES EAUX USEES

Depuis quelques années, la réutilisation des eaux usées est devenue un objectif fondamental pour satisfaire à la demande en eau. A l'échelle industrielle, de nombreux systèmes sont en plein développement. Parmi ceux-ci, la filtration membranaire immergée, couplée à un traitement chimique, conférerait une qualité satisfaisante à l'eau pour un coût relativement faible et une efficacité élevée (Reissman & Uhl, 2006).

Actuellement, de nombreuses villes dans le monde injectent une partie de leurs eaux usées dans leur réseau de potabilisation de l'eau. Par exemple à La Hulpe, en Belgique, 40 % des

eaux en provenance des nappes aquifères sont remplacées par les eaux usées rejetées par les habitants de la ville. Ce système demande la mise en œuvre de techniques complexes et multiples destinées à prévenir toute infection non désirée de l'eau, mais possède l'avantage d'économiser les ressources en eau potable, qui s'amenuisent d'année en année (Rygaard et al., 2009).

La majeure partie des méthodes mises en œuvre à l'heure actuelle consiste cependant en des procédés jusqu'ici uniquement développés à grande échelle. A échelle domestique, la réutilisation des eaux usées reste peu exploitée et il existe très peu de littérature sur le sujet.

La difficulté de la réutilisation des eaux usées vient principalement, au même titre que leur épuration, de l'azote et du phosphore contenus dans les eaux noires, ainsi que des bactéries, virus et résidus médicamenteux qui s'y trouvent. Pour rendre cette eau propre à la consommation, il est indispensable de mettre en œuvre des moyens radicaux, souvent coûteux et complexes, qui ne peuvent être rentables pour le particulier. Néanmoins, il peut être envisagé assez facilement, dans le cas d'une habitation seule, de séparer les eaux noires des eaux grises, voire de ne pas en produire du tout comme dans le cadre de ce projet. Dès lors, il devient imaginable, pour le particulier, de réutiliser ses eaux usées. Le domaine d'utilisation assigné à ces eaux peut cependant avoir des conséquences déterminantes sur leur réutilisation éventuelle. Effectivement, nous avons vu qu'il est bon d'adapter la qualité de l'eau à son usage. Les traitements à mettre en œuvre peuvent donc varier du plus simple au plus complexe, avec un coût croissant (Li et al., 2008). Selon Joseph Orszagh (2012), une eau sale garde dans ses caractéristiques physico-chimiques la marque de son utilisation, et elle ne peut être totalement « renouvelée » qu'au moyen de procédés relativement complexes (mise en régime turbulent de l'eau) laissés aux industries. Il n'est donc pas préconisé de réutiliser les eaux grises pour la consommation. L'on favorisera donc en priorité la réutilisation des eaux grises pour des applications telles que le nettoyage du linge, l'entretien de la maison et éventuellement la vaisselle. En limitant le contact direct avec l'homme, les risques pour la santé sont limités tout en permettant l'utilisation de méthodes d'épuration simples, telles que la filtration utilisée pour la production d'eau de qualité inoffensive.

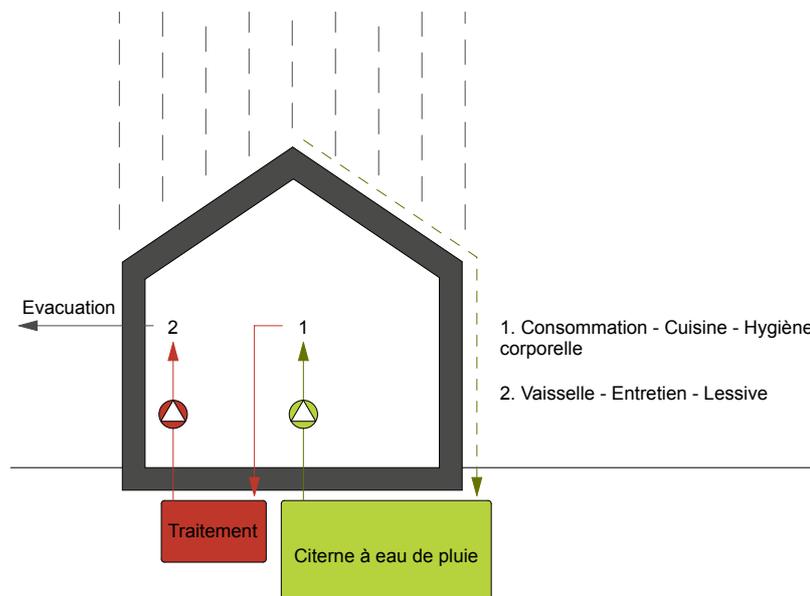


Figure 43: Solutions alternatives - Réutilisation des eaux usées (réalisation : Monaco, 2012)

4.6.3 AUGMENTATION DE LA SURFACE DE COLLECTE

L'une des solutions les plus simples pour pallier à une carence en eau serait finalement d'augmenter tout simplement la surface de collecte. Il n'est bien sûr pas possible, ni rentable, d'agrandir l'habitation uniquement pour pallier à une carence en eau. Par contre, si certaines surfaces telles que l'abri de jardin ou même le garage n'étaient jusqu'alors pas prises en compte dans le système de récolte, cela pourrait s'avérer opportun.

La plupart des maisons disposent également d'un jardin. Les eaux ruisselant sur le terrain pourraient dès lors être elles aussi recueillies au moyen de tranchées convergeant vers le réservoir. Les eaux ruisselant directement sur la terre sont cependant, au même titre que les eaux recueillies par une toiture végétale, extrêmement chargées en bactéries et virus et de turbidité élevée, ce qui en fait des eaux de qualité médiocre. La récolte de ces eaux nécessiterait donc un système de traitement bien plus performant. Le coût et les risques liés à la santé seraient par conséquent également plus élevés. Concrètement, cette alternative est donc peu pertinente.

Par contre, il serait tout-à-fait envisageable de créer une structure au sol, une sorte de toiture artificielle, capable de récolter cette eau. Celle-ci serait de qualité similaire à l'eau récoltée sur le toit, n'entraînant pas la nécessité d'adopter un traitement spécifique. Il ne serait pas non plus nécessaire de dédoubler les tuyauteries. Cette alternative pourrait s'avérer relativement peu coûteuse en comparaison avec d'autres systèmes, et ceci d'autant plus si elle était auto-construite. Cependant, cela n'est possible que si la carence en eau est faible et donc la surface de récolte à mettre en œuvre peu importante. Il est également nécessaire de disposer d'un terrain suffisamment grand. En outre, ce type de structure peu s'avérer très peu esthétique. Il serait donc important d'étudier son intégration au site, qu'il s'agisse de sa position ou de sa disposition, sans gêner le confort (visuel, olfactif, acoustique) des habitants et de leur voisinage.

En ce qui concerne l'habitation étudiée, c'est probablement le système qui aurait été privilégié. En effet, étant donné les précipitations moyennes mensuelles, le déficit en eau aurait été relativement faible. De plus, l'habitation dispose d'une immense surface de terrain pentu et il n'y a aucun voisin proche susceptible d'être incommodé. Il aurait néanmoins fallu réfléchir à un moyen d'intégration au site naturel ou, à défaut, à un moyen de dissimulation.

Si, avec le temps, les habitants de la maison s'aperçoivent que la quantité d'eau récoltée par leur toiture est légèrement insuffisante pour leur consommation, rien ne les empêche, à condition d'agrandir également leur volume de stockage, de créer une zone de récolte supplémentaire.

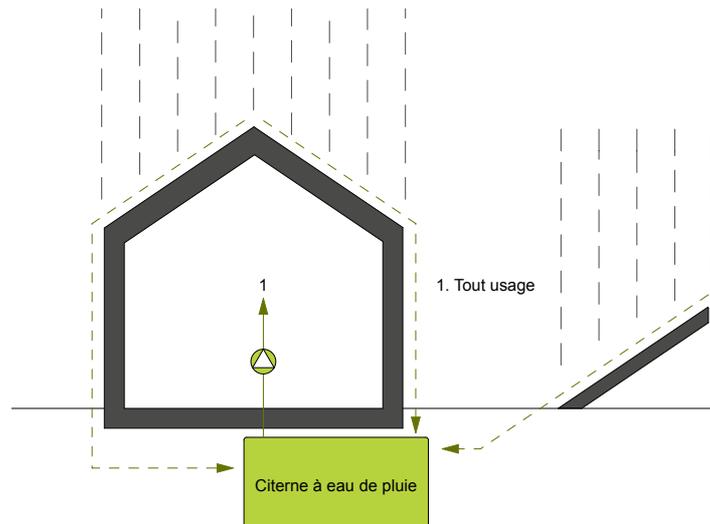


Figure 44: Solutions alternatives - Augmentation de la surface de collecte (réalisation : Monaco, 2012)

4.7 SYNTHÈSE

Dans cette section, nous avons essayé de concevoir un système global permettant à la fois d'alimenter en eau l'habitation étudiée tout en assainissant et en évacuant les eaux usées. Nous avons ainsi analysé étape par étape les moyens grâce auxquels il était possible de traiter l'eau dans ses états successifs.

Nous avons mis l'accent sur le fait qu'il est à la portée de tous de récolter les eaux de pluie et que, dans le cas d'une habitation autonome, ce système devait être choisi en priorité. Dans le cas qui nous occupe, ces eaux permettent d'ailleurs de subvenir à l'entièreté des besoins du ménage.

Pour récolter les eaux de pluie et les traiter efficacement, de nombreux facteurs doivent cependant être pris en compte. Il faut se faire une idée générale des principales caractéristiques de l'eau de pluie locale mais également être capable de mesurer l'influence des matériaux et de leur entretien sur la qualité de cette eau.

Une fois cette eau récoltée et stockée, nous avons pu choisir comment la traiter et l'utiliser pour la gérer durablement. Dans un premier temps, une réflexion a été portée sur la manière de réduire la consommation en eau d'un ménage. C'est ainsi que nous avons opté pour l'usage de toilettes sèches. Nous nous sommes ensuite intéressés à un système de filtration physique permettant d'adapter la qualité de l'eau à son usage. L'accent a également été mis sur l'importance d'un contrôle régulier de l'installation afin d'éviter tout incident sanitaire.

La gestion durable de l'eau ne s'arrête cependant pas là. Dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons ciblé avec précision les caractéristiques des eaux usées rejetées par le ménage et avons proposé des systèmes de traitement écologique qui pourraient convenir. Notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une fosse septique en lieu de prétraitement, suivie d'un système de traitement au moyen d'un étang de finissage. Grâce à ce système d'épuration, les propriétaires peuvent être certains de la qualité de l'eau infiltrée dans le sol.

Ces trois grandes étapes de traitement de l'eau s'articulent entre elles de manière à former un cycle complet de gestion de l'eau. Le schéma récapitulatif du système intégral se trouve ci-après.

Grâce à ces dispositifs, l'habitation s'auto-suffit en ce qui concerne le domaine de l'eau. Non contente de cela, elle le fait dans un respect maximal de l'environnement et de l'utilisateur. La stratégie élaborée tient également compte d'un souci de réduction maximale de sa consommation électrique afin de ne pas porter préjudice à la suite du travail.

Dans ce chapitre, nous avons donc pu élaborer une stratégie complète de l'eau qui réponde à l'ensemble des objectifs que nous nous étions fixés.

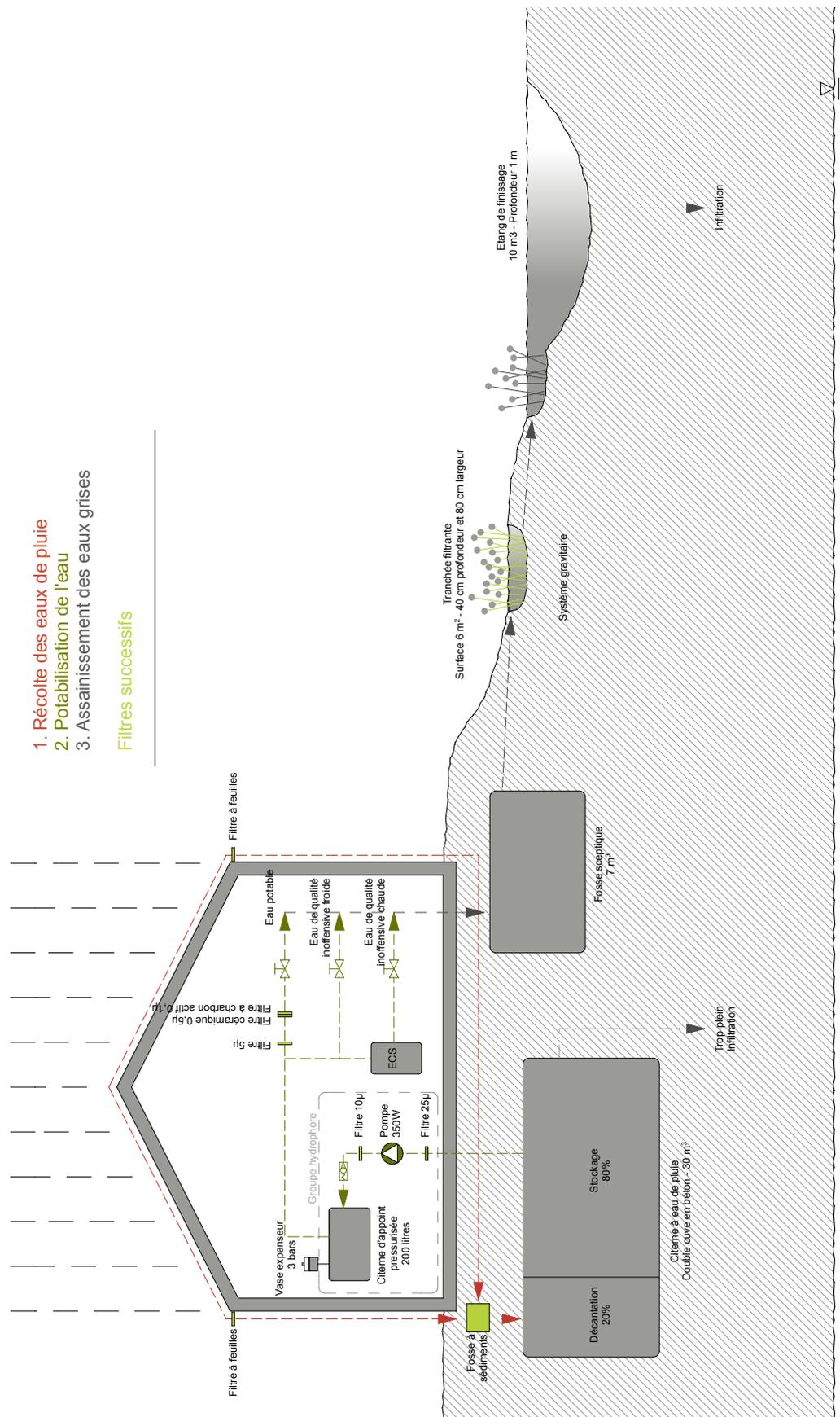


Figure 45: Schéma récapitulatif de la récolte, du traitement et de l'épuration des eaux (réalisation : Monaco, 2012)

CHAPITRE 5

PROBLEMATIQUE DE L'ELECTRICITE

5 PROBLEMATIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

5.1 INTRODUCTION

5.1.1 OBJECTIFS

Après l'autonomie en eau, le deuxième grand challenge de cette habitation est l'autonomie en électricité. Plusieurs paramètres sont susceptibles d'influencer la faisabilité du projet dans ce domaine : la variabilité des sources d'énergie pour la production électrique, les difficultés de stockage et la surconsommation électrique des ménages. Le chapitre suivant traite donc de chacune de ces problématiques.

Nous commencerons par l'analyse des moyens à notre disposition pour produire de l'électricité et assurer l'alimentation continue d'un foyer. Afin de favoriser la production in situ, une réflexion devra être portée sur la consommation électrique, qui devra être réduite à son strict minimum. Pour ce faire, nous nous intéresserons en détail à l'ensemble des équipements de la maison susceptibles de consommer de l'électricité. Nous traiterons ainsi de l'éclairage et de l'électroménager, mais également des systèmes de chauffage, de ventilation, de refroidissement et de production d'eau chaude sanitaire. Une fois la consommation électrique totale déterminée, nous pourrions évaluer la faisabilité d'une éventuelle autonomie en tentant de dimensionner l'installation.

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer une « stratégie de l'électricité » durable permettant à l'ensemble de l'habitation de fonctionner dans des conditions de confort tout en minimisant les besoins électriques. Le respect de l'environnement sera placé au centre de notre attention. C'est pourquoi nous ferons appel autant que possible aux énergies renouvelables, tant pour la production d'électricité que l'eau chaude sanitaire et le chauffage. L'énergie la moins polluante et la moins chère reste cependant celle que nous ne consommons pas (Filloux, 2010). Cet adage à l'esprit, nous pourrions nous inscrire dans une démarche durable, respectueuse des habitants, de l'habitat et de son environnement.

5.1.2 MISE EN CONTEXTE

Dans le monde, plusieurs millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité. L'écrasante majorité d'entre elles vivent en milieu rural où la faible densité de population, par rapport à l'éloignement des réseaux, rend prohibitif le coût du raccordement (Solar Technology AG, 2012).

En France, on estime qu'environ 300 000 bâtiments, répartis en montagne, dans les communes rurales et en Outre-Mer, ne sont pas électrifiés. Il faut compter 15 000 euros par kilomètre pour une ligne électrique aérienne et environ 45 000 euros lorsque celle-ci, pour des raisons diverses, doit être enterrée (Blugeon, 2010). Il est donc intéressant, au-delà même de l'aspect environnemental, d'évaluer la faisabilité d'une production décentralisée au moyen d'énergies renouvelables.

5.2 LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ IN SITU

5.2.1 LE PHOTOVOLTAÏQUE

5.2.1.1 PRINCIPE GENERAL

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Becquerel (Hegger et al., 2011). La production photovoltaïque d'électricité repose sur l'effet photoélectrique, à savoir le transfert de l'énergie contenue dans les photons de la lumière solaire sur des électrons liés à la matière.

5.2.1.2 ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS

LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs dont l'un est dopé par un matériau qui contient plus d'électrons que lui (type N) et l'autre par un matériau qui en contient moins (type P). Ces deux matériaux sont mis en contact dans une diode, formant la jonction PN. Sous l'excitation des photons lumineux, des électrons vont s'extraire de la couche N et migrer vers la couche P, modifiant les charges à l'intérieur de la cellule. Des électrodes placées sur chacun des matériaux captent alors une différence de potentiel, il y a génération de courant (Hegger et al., 2011).

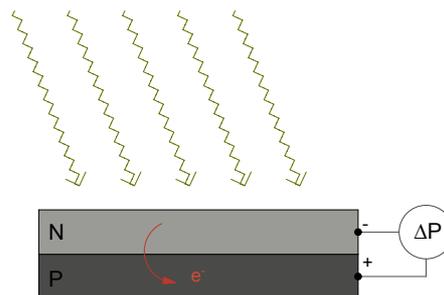


Figure 46: Principe du photovoltaïque (réalisation : Monaco ; source : Hegger et al., 2011)

Les cellules photovoltaïques se divisent en deux grandes familles que sont les cellules cristallines et celles à couche mince. Chacune d'elles possède ses propres avantages et inconvénients.

LES CELLULES CRISTALLINES

Les cellules cristallines peuvent être monocristallines ou polycristallines. Les premières se caractérisent par leur texture uniforme, alors que toute une série de cristaux sont visibles à la surface des secondes. Toutes deux sont en silicium. Les cellules monocristallines présentent un très bon rendement mais sont relativement chères et produisent peu sous éclaircissement réduit. Les cellules polycristallines possèdent le même inconvénient et un rendement légèrement inférieur, mais sont moins chères.

LES CELLULES À COUCHE MINCE

Les cellules à couche mince se divisent en trois catégories : les cellules composées de silicium amorphe, celles à base de cuivre, indium et sélénium (CIS) et celles à tellurure de cadmium (Cdte). Ces produits occupent une part plus faible du marché et ont un rendement plus faible, mais ils sont moins coûteux à l'achat car leur fabrication ne nécessite pas autant

d'énergie que les panneaux cristallins. Ils présentent également de meilleurs rendements par faible luminosité.

Le tableau ci-dessous récapitule les produits existants, leur rendement, leur prix et leur efficacité par faible luminosité.

Type	Rendement	Prix	Production par faible luminosité	Part de marché
Monocristallin	15-17%	Elevé	Faible	30%
Polycristallin	13-15%	Moyen	Faible	60%
Amorphe	6-10%	Faible	Elevée	10%
CIS	8-12%	Faible	Elevée	< 1%
Cdte	8-10%	Faible	Elevée	< 1%

Tableau 18: Caractéristiques principales des différents types de panneaux photovoltaïques (réalisation : Monaco ; source : Riolet, 2010)

LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

La tension et la puissance d'une cellule photovoltaïque sont trop faibles pour la plupart des applications courantes. A titre d'exemple, la tension varie de 0,5 à 0,6 Volts (Blugeon, 2008). Pour atteindre des ordres de grandeur compatibles avec la pratique, celles-ci sont montées en série, augmentant ainsi le voltage. Un capteur est généralement constitué de 36 cellules et produit une tension nominale de 12 Volts, en courant continu. Elles sont ensuite recouvertes de feuilles protectrices avant et arrière, qui peuvent être en verre ou en plastique, afin d'assurer la résistance mécanique de l'élément. C'est cet assemblage composite qui est appelé module ou panneau photovoltaïque.

Ces modules sont généralement vendus sur le marché dans des dimensions standards variant de 0,5 à 1,5 m². Néanmoins, de plus en plus de fabricants les réalisent sur mesure, selon les directives des architectes, permettant ainsi une meilleure intégration architecturale (Hegger et al., 2011).

Le choix final du module résulte avant tout de l'objectif recherché. En cas de besoin de puissance importante, les panneaux cristallins, et principalement polycristallins, offrent le meilleur rapport qualité/prix. Mais l'efficacité des panneaux à couche mince ne doit pas être sous-estimée. Ils sont nettement moins onéreux et, lorsqu'on dispose d'espace en suffisance, permettent d'obtenir une installation de puissance élevée avec quelques panneaux supplémentaires. De plus, leur rendement par faible luminosité étant meilleur, ils captent la lumière sur une période de temps plus longue, en matinée et en soirée. Selon le climat, cet avantage peut influencer la décision finale (Riolet, 2010).

5.2.1.3 LES PERFORMANCES DE L'INSTALLATION

Le taux de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ne dépasse guère 20%. Ce faible rendement est dû au fait que seule une partie de l'énergie des photons est utilisable pour libérer un électron, le surplus étant transformé en chaleur. L'énergie nécessaire à la libération d'un électron varie selon le matériau utilisé, c'est pourquoi tous les panneaux n'ont pas le même rendement. La chaleur générée par l'effet photoélectrique est un phénomène physique inévitable, même si les chercheurs travaillent à l'amélioration de ces procédés (Hegger et al., 2011).

La puissance d'un panneau photovoltaïque est fournie par les constructeurs pour un ensoleillement maximum évalué sur le territoire français à 1000 W/m² et ce par 25°C. Il s'agit donc de la puissance maximale de production d'un panneau puisqu'elle est évaluée dans des conditions optimales. Elle est donnée en Watt-crête (Wc).

POSITIONNEMENT

On considère la position idéale d'un panneau photovoltaïque selon une orientation plein sud et une inclinaison de 30 à 35°C. Cette dernière résulte d'un juste compromis entre les inclinaisons idéales estivale (plus faible) et hivernale (plus élevée). Des diagrammes fournissent les baisses de rendement à considérer lorsqu'on s'éloigne de cette position, soit en inclinaison, soit en orientation. Concernant l'orientation, il est admis qu'entre 15 et 45°, la baisse de rendement est faible. Une variation de 15° à 20° par rapport au sud n'entraînera pas non plus de pertes trop importantes. Ceci est dû au fait qu'en France, même en cas de forte nébulosité, le rayonnement solaire comporte environ 50% de rayonnement diffus. Au-delà de ces valeurs, par contre, le photovoltaïque perd nettement de son intérêt (Blugeon, 2008).

COULEUR

De plus, la puissance maximale d'un panneau dépend de la couleur du module. Théoriquement, celle-ci varie du bleu foncé au noir même s'il est aujourd'hui possible, en modifiant le revêtement anti-réfléchissant des panneaux cristallins, d'atteindre des teintes rougeâtre, jaunâtre ou même verdâtre. Cette avancée favorise l'intégration architecturale du photovoltaïque mais plus la teinte sera claire, plus le rendement diminuera. La densité des cellules entre également en ligne de compte. Les panneaux semi-transparents ont une densité moindre, s'accompagnant logiquement d'une baisse d'efficacité proportionnelle à l'espacement des cellules (Hegger et al., 2011).

OMBRAGE

Enfin, l'ombrage a bien sûr un impact défavorable sur l'installation. Les cellules d'un panneau étant montées en série, lorsque l'une d'elle est dans l'ombre, le rendement total du module devient celui de la cellule dont le rendement est le plus faible. C'est pour cette raison qu'il est préférable d'éviter toute ombre portée sur les panneaux photovoltaïques. Il existerait aujourd'hui des diodes by-pass permettant de limiter cet effet négatif en court-circuitant la partie ombragée mais cette technologie est encore peu répandue et reste assez coûteuse (Hegger et al., 2011).

CONCLUSIONS

En conclusion, les conditions d'installation sont primordiales pour son rendement. En cas de pose en toiture, et malgré le manque d'esthétique, il est plus avantageux de déposer les panneaux sur la couverture plutôt que de la substituer. En effet, outre les questions d'étanchéité de la toiture se posent les problèmes de ventilation des panneaux, dont l'échauffement diminue le rendement. Si la toiture n'est pas idéalement orientée, une pose au sol doit être privilégiée. Il existe dans ce cas des systèmes de traceurs qui suivent la course du soleil. Ceux-ci peuvent la suivre selon l'orientation est-ouest uniquement, ou selon l'orientation et l'inclinaison. Ces systèmes sont onéreux mais assurent un rendement optimal des panneaux. La production d'électricité supplémentaire est évaluée à environ 30% (Riolet, 2010).

5.2.2 L'EOLIEN

5.2.2.1 PRINCIPE GENERAL

Le principe d'une éolienne repose sur le captage du déplacement de l'air à l'aide de moyens mécaniques, pour la convertir en force motrice. Il s'agit d'une forme indirecte d'énergie solaire car les mouvements d'air sont engendrés par les variations de pression et de

température sous l'action du rayonnement solaire. Comme l'énergie solaire, il s'agit d'une énergie naturelle et inépuisable.

Les premières éoliennes sont apparues en 1802, lorsque Lord Kelvin eut l'idée de coupler un moulin à vent à une génératrice pour produire de l'électricité. Depuis, l'éolienne n'a eu de cesse d'évoluer jusqu'à aboutir aux modèles que nous connaissons aujourd'hui (Riolet, 2010).

Dans le cadre de ce travail, nous ne traiterons que du petit éolien, c'est-à-dire à usage domestique. Celui-ci couvre une gamme de puissances variant de 1 W à 5 kW et le rotor dépasse rarement 10 mètres de diamètre.

5.2.2.2 ELEMENTS CONSTITUTIFS

Une éolienne, également appelée aérogénérateur, se compose de plusieurs pièces maîtresses : un générateur, des pales et un dispositif de sécurité. Nous verrons a posteriori que des équipements complémentaires peuvent lui être ajoutés (Riolet, 2010).

LE GENERATEUR

Le générateur est la pièce de l'éolienne grâce à laquelle la production d'électricité est possible. Il peut s'agir d'un alternateur, qui produit du courant alternatif, ou d'une dynamo, qui produit du courant continu. Il se compose d'un matériau conducteur, du cuivre par exemple, disposé en spires. Sous l'action d'un mouvement, un champ magnétique va se créer au sein de la bobine de cuivre, lui arrachant des électrons et générant ainsi du courant. Plus le champ magnétique est fort et rapide, plus la quantité d'électricité produite sera importante, sous réserve de la puissance du générateur.

LES PALES

Le mouvement nécessaire à la création d'un champ magnétique est produit par les pales. Cet élément joue un rôle tout particulier puisqu'il conditionne la prise au vent de l'éolienne, et ainsi sa productivité. De nombreux paramètres doivent être pris en compte.

Tout d'abord, elles doivent être de forme aérodynamique car, tout comme les ailes d'un avion, les phénomènes de portance et de traînée entrent en jeu. Leur taille, et par là leur surface, doit être optimisée par rapport à la puissance du générateur. En effet, des pales trop grandes forceraient le système tandis que des pales trop petites ne suffiraient pas à l'entraîner. Leur poids doit être étudié et résulte d'un compromis entre inertie et vitesse au démarrage. Notons que le poids et la forme des pales doivent être absolument identiques sous peine d'entraîner des frottements intenses sur le système et d'ainsi en réduire le rendement et la durée de vie. Enfin, le nombre de pales influence fortement le fonctionnement d'une éolienne. Lorsqu'elles sont nombreuses, l'aérogénérateur se déclenche à des vitesses de vent faibles mais n'atteint pas une vitesse élevée ; c'est la régularité et non la puissance qui est privilégiée. En faible nombre, il démarre moins rapidement mais atteint des vitesses plus grandes, c'est la puissance qui est privilégiée au détriment de la régularité.

LE DISPOSITIF DE SECURITE

En cas de vents extrêmement violents, il est indispensable de pouvoir freiner la rotation du système sans quoi les pales, le générateur ou l'éolienne toute entière pourraient se détériorer. C'est pourquoi des dispositifs de sécurité sont prévus sur chaque éolienne. Selon le type, il peut s'agir d'un frein à mâchoire ou à disque, ou d'un système d'effacement latéral ou vertical, qui modifie la position de l'éolienne pour diminuer sa prise au vent. Il est également utile de disposer d'un système d'arrêt d'urgence au cas où le dispositif de

freinage ne serait pas suffisant. Généralement, ces derniers s'enclenchent pour des vents supérieurs à 70 km/h, alors qu'il est préconisé d'arrêter le système à partir de 90 à 100 km/h.

5.2.2.3 TYPES D'ÉOLIENNES

Il existe deux grandes familles d'éoliennes que sont les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical. Chacun de ces systèmes dispose de ses propres avantages et inconvénients (Claessens et al., 2010).

LES ÉOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues. Elles sont capables de s'orienter d'elles-mêmes face aux vents et possèdent un bon rendement théorique, d'environ 30%. Il en existe à deux pales, mais les éoliennes à trois pales sont les plus courantes car elles possèdent le meilleur compromis entre seuil de déclenchement et vitesse atteignable. Les éoliennes de ce type sont élevées sur un mât dont la stabilité est renforcée par des haubans. Elles ont donc une emprise au sol non-négligeable et il convient de s'assurer de la stabilité du sol (Blugeon, 2008 & Riolet, 2010).

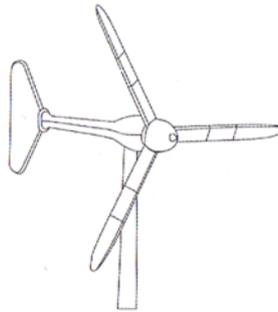


Figure 47: Mini-éolienne tripale à axe horizontal (source : Riolet, 2010)

LES ÉOLIENNES A AXE VERTICAL

Les éoliennes à axe vertical sont nettement moins répandues, mais présentent des possibilités architecturales bien plus variées. Elles possèdent l'énorme avantage de capter le vent dans toutes les directions et ont un seuil de déclenchement faible. Elles s'adaptent également mieux aux turbulences des vents. Elles possèdent par compte un moins bon rendement, de l'ordre de deux à trois fois inférieur à celui d'un aérogénérateur à axe horizontal. Généralement onéreuses, elles présentent une bonne intégration en milieu urbain car de nombreux systèmes permettent de les placer sur le faîte du toit. Elles sont néanmoins susceptibles d'induire des vibrations au sein de l'habitation et leur bruit peut s'avérer gênant (Blugeon, 2008 & Riolet, 2010).

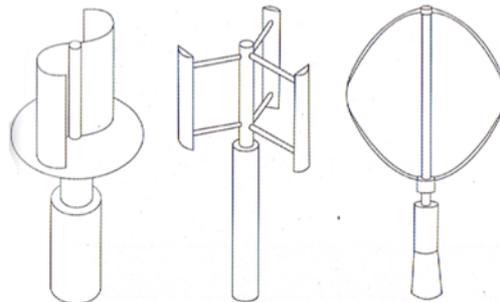


Figure 48: Mini-éoliennes à axe vertical de type Savonius et Darrieus (source : Riolet, 2010)

5.2.2.4 PERFORMANCES DE L'ÉOLIENNE

La puissance éolienne récupérable par une installation est proportionnelle au carré du diamètre du rotor et au cube de la vitesse du vent. Elle est cependant soumise à la limite de Betz, qui minore ce résultat. Selon ce scientifique, seuls les 16/27^{ème} de la puissance du vent peuvent être valorisés en énergie. Malgré cela, à puissance équivalente et en conditions optimales, une éolienne produit plus d'énergie que des panneaux photovoltaïques (Blugeon, 2008).

La puissance d'une éolienne est généralement fournie par le fabricant en Watt-heure. Elle est évaluée dans des conditions optimales et pour une vitesse de vent de 40 km/h, jugée comme étant la vitesse à laquelle elle atteint sa puissance maximale. Selon les conditions climatiques, elle ne sera donc pas toujours atteinte.

Les performances réelles d'une éolienne dépendent évidemment du potentiel éolien du site. Celui-ci augmente avec la vitesse des vents, mais leur régularité entre également en compte. Le potentiel éolien n'est pas uniformément réparti mais varie selon la localisation géographique et même selon la saison et l'altitude. A l'échelle de la France, on constate qu'il est généralement plus fort le long des côtes maritimes et dans certains couloirs aériens (mistral, tramontane,...), mais les caractéristiques propres du site peuvent l'influencer considérablement (Blugeon, 2008). Les vents peuvent être ralentis par le relief (ou, selon la typologie, accélérés), la végétation, les habitations ou tout autre obstacle. Outre la perte de vitesse, ces obstacles entraînent des turbulences qui nuisent au bon fonctionnement et à la durée de vie des aérogénérateurs, principalement ceux à axe horizontal (Riolet, 2010). Afin de limiter leur effet néfaste, il est donc recommandé de placer les éoliennes à une hauteur suffisante, idéalement six mètres au-dessus de l'obstacle, ou suffisamment éloignées, à 75 mètres environ. Ces précautions ne sont bien sûr pas toujours applicables, d'autant plus qu'une éolienne de hauteur supérieure à douze mètres est soumise à un permis d'urbanisme.

Concrètement, afin de connaître le potentiel éolien réel d'un site, il est recommandé de placer un anémomètre à l'endroit supposé optimal. Celui-ci mesurera, sur une durée minimale d'un an, la variation de la vitesse des vents et leur direction. Selon les constructeurs, la vitesse minimale exploitable est de 4 m/s (Claessens et al., 2010), mais l'on estime qu'une éolienne n'est véritablement rentable qu'avec des vents de 5 à 6 m/s de vitesse moyenne (Vanderstadt, 2011) et ce, à condition de tourner un quart du temps à sa vitesse nominale.

5.2.3 AUTRES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

L'éolien et le photovoltaïque sont à ce jour les systèmes de production électrique les mieux maîtrisés et les plus répandus. Il en existe cependant d'autres qui n'exploitent pas les énergies renouvelables, n'existent pas encore à échelle domestique ou ne reposent simplement pas sur des dispositifs suffisamment mûrs pour envahir le marché. Il nous paraît cependant intéressant de les aborder brièvement dans ce chapitre.

5.2.3.1 LES GROUPES ELECTROGENES

Les groupes électrogènes associent un moteur à combustion interne à un générateur de courant. Le moteur convertit l'énergie stockée dans le combustible en énergie mécanique capable d'entraîner un alternateur. Ils sont généralement à diesel ou à essence, exploitant donc des énergies fossiles. De ce fait, les groupes électrogènes ne correspondent pas à la démarche durable dans laquelle nous souhaitons nous inscrire. Ils sont relativement fréquents dans les habitations autonomes en tant qu'appoint aux énergies renouvelables puisqu'ils offrent une sécurité de production. Leur emploi doit cependant être limité car ils

sont susceptibles d'entraîner de considérables frais de fonctionnement et de maintenance, tout en possédant une longévité restreinte et un très mauvais rendement.

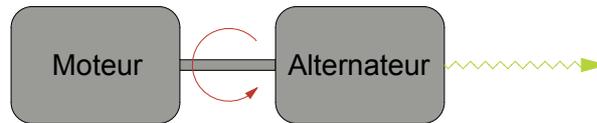


Figure 49: Principe du groupe électrogène (réalisation : Monaco, 2012)

D'ici quelques années, les progrès en matière de moteurs permettront peut-être l'apparition de groupes électrogènes écologiques, exploitant du biogaz ou du biocarburant (Boudellal, 2011).

5.2.3.2 LE MICRO-HYDRAULIQUE

Pour les sites disposant d'une rivière ou d'un point d'eau avec un courant suffisant à proximité, l'énergie micro-hydraulique devrait pouvoir être envisagée. Ce système fonctionnerait comme une centrale hydro-électrique à petite échelle, assurant une production régulière et répartie sur toute l'année. Ce procédé ne peut cependant s'appliquer qu'à quelques sites particulièrement favorables et n'est pas encore véritablement développé. La plupart des installations domestiques exploitant le courant de l'eau sont à ce jour des installations de fortune réalisées par le particulier (Boudellal, 2011).

5.2.3.3 LA COGENERATION

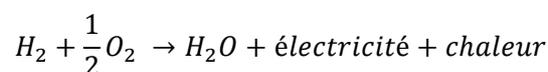
La production d'électricité est un procédé à faible rendement. On estime que, dans une centrale électrique, seule 30% de l'énergie primaire est transformée en électricité, le reste disparaissant sous forme de chaleur. Le principe de la cogénération est, à partir d'un même combustible, d'exploiter à la fois l'électricité produite et la chaleur dégagée, pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire par exemple.

Le mode de fonctionnement est pratiquement le même que pour groupe électrogène. Il s'agit d'un moteur classique actionnant un générateur de courant. Un échangeur est placé au sein du dispositif pour récolter la chaleur. Actuellement, la plupart des unités de micro-cogénération utilisent le gaz naturel ou des combustibles fossiles. Les unités exploitant les granulés de bois sont en plein développement et seront probablement disponibles à petite échelle d'ici quelques années (Denninger, 2012).

Selon Hugo Vanderstadt (2011), les unités de micro-cogénération à biomasse constituent l'avenir des habitations autonomes. Elles permettraient de pallier à la variabilité des énergies solaires pour la production thermique et électrique (panneaux solaires et photovoltaïques) lorsque le soleil se ferait discret. La difficulté réside dans le fait que l'électricité produite et la chaleur récoltée ne correspondront probablement pas aux besoins dans des proportions adéquates.

5.2.3.4 LA PILE A COMBUSTIBLE

Le principe de la pile à combustible repose sur la formation d'électricité et d'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène grâce à une réaction chimique. Ce procédé rejette également de la chaleur.



Une pile à combustible ne peut produire qu'une tension de 0,5 à 1 Volt environ. En associant plusieurs piles en série, il serait possible d'atteindre des tensions exploitables. La chaleur rejetée pourrait quant à elle être exploitée pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire.

L'oxygène utilisé est celui de l'air, mais l'hydrogène doit être acheté. Celui-ci est produit à l'échelle industrielle à partir de gaz naturel et n'est donc pas renouvelable. De plus, il s'agit d'un gaz inflammable et potentiellement dangereux dans une habitation (Boudellal, 2011).

5.2.4 LE STOCKAGE DE L'ELECTRICITE

5.2.4.1 LA NECESSITE DU STOCKAGE

Comme nous l'avons vu, les systèmes de production d'électricité in situ (éolien et photovoltaïque) produisent cette énergie de manière variable. Généralement, cette production est même déphasée avec la consommation électrique d'un ménage. Le photovoltaïque produit la majeure partie de son énergie lorsque le soleil irradie, i.e. durant la journée et en été. Or, les besoins d'une habitation se font davantage sentir en hiver, en début et en fin de journée. En ce qui concerne l'éolien, les périodes de production sont nettement plus variables. Si l'on constate parfois des périodes de l'année durant lesquelles le vent souffle davantage, il est pratiquement impossible de prévoir avec exactitude leur répartition sur une journée.

La variabilité et le déphasage dont souffrent ces technologies constituent donc les principaux freins à leur développement, à petite comme à grande échelle. Pour pallier à cela, le stockage de l'électricité est absolument essentiel. Celui-ci agit comme un véritable tampon, qui stocke le surplus d'électricité et le restitue lorsque la production est insuffisante. En site isolé, toute l'énergie qui ne sera pas stockée ou consommée immédiatement sera définitivement perdue. Les chercheurs sont parfaitement conscients de l'importance de ces équipements sur l'extension des énergies renouvelables. C'est pourquoi ce domaine est en plein essor et de nombreuses technologies se développent dans le monde (Kaldellis & Zafirakis, 2007). La plupart d'entre elles ne sont cependant pas encore accessibles au particulier.

5.2.4.2 LES BATTERIES

Les batteries sont à ce jour la seule technologie véritablement accessible au particulier, tant en matière de budget que d'infrastructure. Elles rendent de bons services mais possèdent de nombreux défauts, malgré les progrès constants dont elles font l'objet.

TYPES DE BATTERIES

Il existe deux grandes familles de batteries. Les premières, les batteries à charge constante, sont prévues pour garder leur niveau de charge le plus élevé possible et délivrer un grand nombre d'ampères en un minimum de temps. Elles équipent les véhicules et ne conviennent pas pour les installations électriques de type renouvelable. Les secondes, les batteries à décharge profonde, sont quant à elles parfaitement adaptées à cette utilisation et seront à privilégier. Les plus classiques sont au plomb, mais de récents modèles au gel ont fait leur apparition.

Les modèles au plomb présentent un prix relativement abordable. Elles sont répandues mais ne possèdent pas des caractéristiques idéales. Par exemple, elles se déchargent très rapidement lorsqu'elles ne sont plus alimentées. Les batteries au gel sont nettement plus onéreuses, mais possèdent des caractéristiques extrêmement intéressantes. Elles ont une autodécharge très faible, évaluée à environ 2% par mois, ce qui leur permet de rester

chargées des mois entiers sans être alimentées. Elles sont capables de s'adapter à un chargement rapide comme à un chargement lent et n'émettent pas de dégagement gazeux, limitant ainsi les risques d'intoxication, même dans un local mal ventilé. Elles possèdent également un nombre de cycle de charge/décharge une fois et demi supérieure aux batteries au plomb. L'investissement est naturellement plus grand, mais l'installation n'en est que plus performante (Riolet, 2010).

CARACTERISTIQUES DES BATTERIES

Les critères de choix des batteries sont leur puissance, communiquée en Ampère-heure (Ah) et généralement évaluée sur une période de vingt heures, leur niveau de décharge admissible, qui doit être le plus bas possible, et le nombre de cycles de charge/décharge qu'elles peuvent supporter. Malgré ces critères plutôt objectifs, le rendement d'une batterie peut varier en fonction de l'installation. A titre d'exemple, l'efficacité de la réaction chimique s'opérant en leur sein variera selon la température du local dans lequel elles seront placées. Ce local ne doit donc être soumis ni aux surchauffes, ni au gel (Riolet, 2010).

Les batteries possèdent deux principaux inconvénients. Le premier est leur effet néfaste sur l'environnement. Contenant des métaux lourds et de l'acide, elles sont une importante source de pollution potentielle. Afin de limiter leur impact, il est important de les choisir conformément aux normes européennes en vigueur, de les utiliser judicieusement et de les porter en déchetterie en fin de vie, où certains composants pourront être recyclés. Le second inconvénient, qui renforce d'ailleurs le premier, est leur durée de vie limitée. Elle est généralement estimée à 5-6 ans pour les batteries au plomb mais, correctement mises en œuvre, peuvent atteindre jusqu'à 10 ans. Les batteries au gel ont quant à elles une durée de vie maximale de 15 ans (Vanderstadt, 2011).

De nombreux chercheurs travaillent à l'élaboration de batteries écologiques qui n'utiliseraient pas de métaux lourds et dont l'électrolyte serait biodégradable. Ce type de produit n'est cependant pas encore une réalité (Riolet, 2010).

EQUIPEMENTS CONNEXES

Les batteries, pour être correctement exploitées, font appel à toute une série d'équipements connexes que nous allons brièvement évoquer.

LE REGULATEUR

Le rôle du régulateur est, comme son nom l'indique, de réguler. Il doit se placer en amont des batteries et remplit deux fonctions principales. La première est d'empêcher les surtensions en provenance de l'éolienne ou des panneaux photovoltaïques, alors que la seconde est d'assurer l'alimentation constante des batteries en courant continu. Lorsque la tension sera trop faible pour permettre le chargement des batteries, le rôle du régulateur est donc de stopper l'alimentation. Lorsque celles-ci sont chargées, il assure l'alimentation strictement nécessaire pour les maintenir en l'état.

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant continu. Il leur suffit juste de passer au travers du régulateur pour recharger, si nécessaire, les batteries. La plupart des éoliennes, par contre, produisent un courant alternatif. Il est avantageux de maintenir ce courant en alternatif jusqu'à l'arrivée aux batteries car le transport du courant continu implique un taux de perte élevé et des câbles de grosse section. Dans ce cas, un redresseur peut être couplé au régulateur afin de permettre l'alimentation des batteries (Riolet, 2010).

LE COUPLEUR DE BATTERIES

Pour fournir une puissance suffisante à l'alimentation d'un foyer, les batteries doivent être multipliées. A titre indicatif, une batterie seule, d'une capacité respectable de 70 Ah, permet

d'alimenter quelques ampoules économiques durant 5 à 6 heures et deux petits appareils électroniques tels qu'une radio ou un chargeur de piles. Les batteries peuvent être montées en série, pour augmenter le voltage (passer de 12 à 24 ou 48 Volts), mais il est également possible de les brancher en parallèle. Pour que ce type d'installation fonctionne, il faut que les batteries possèdent exactement les mêmes caractéristiques (type, capacité, âge,...). Dans le cas contraire, la mauvaise répartition du courant en leur sein causerait la ruine prématurée de l'installation.

Le rôle du coupleur est de rendre chaque série de batteries indépendante l'une de l'autre. Il s'agit d'un véritable séparateur destiné à gérer la charge des batteries, en surveillant en permanence leur niveau de charge. Il envoie systématiquement le courant vers les batteries les moins chargées, et coupe leur alimentation lorsqu'elles le sont totalement. Grâce à ce système, le parc d'accumulateurs est optimisé et sa durée de vie augmentée (Riolet, 2010).

L'ONDULEUR

La plupart des équipements d'une habitation fonctionnent avec du courant alternatif. Or, le courant puisé d'un parc de batteries ou, à défaut, produit par des panneaux photovoltaïques, est un courant continu. Le rôle de l'onduleur est de transformer ce courant continu en courant alternatif 220 Volts et 50 Hertz afin qu'il soit exploitable par les équipements de la maison. Il doit être dimensionné en fonction de la puissance maximale à fournir, appelée puissance de crête. L'onduleur est un appareil sujet aux déperditions, qui peuvent varier de 5 à 15%. Il doit donc être choisi avec le meilleur rendement possible (Riolet, 2010).

5.2.4.3 AUTRES MOYENS DE STOCKAGE

Comme nous l'avons abordé précédemment, le stockage de l'énergie est un point délicat dans le développement des énergies renouvelables, et fait l'objet de nombreuses expérimentations. Ces systèmes doivent remplir plusieurs critères. Ils doivent ainsi posséder une longue durée de vie, une capacité de stockage importante pour un faible encombrement, être sûrs et les plus respectueux possibles de l'environnement. En outre, ils ne doivent pas être trop onéreux, d'autant plus qu'ils constituent environ 30% du coût total de l'installation. Les systèmes étudiés peuvent être de nature mécanique, électrique ou chimique. Nombre d'entre eux ne répondent pas, à l'heure actuelle, à ces critères, ou ne sont pas encore exploitables à l'échelle domestique. D'autres sont purement théoriques et nul ne sait s'ils pourront réellement s'avérer efficaces dans le futur. Enfin, certains existent depuis longtemps mais ne sont efficaces que dans des conditions très particulières (Rahman et al., 2011). Néanmoins, la plupart d'entre eux constituent peut-être le stockage de demain, raison pour laquelle il est important de les évoquer.

LES SYSTEMES MECANIQUES

Parmi les systèmes mécaniques de stockage, citons les systèmes à volant d'inertie, qui transforment l'électricité en énergie cinétique. La masse et l'inertie de l'hélice utilisée entrent ensuite en compte dans l'efficacité de la restitution de l'électricité. Ces systèmes existent mais ne sont actuellement pas très performants (Rahman et al., 2011).

Il existe également des systèmes à air comprimé, pour lesquels l'électricité sert à alimenter un compresseur. L'air ainsi stocké permet ensuite d'alimenter une turbine à gaz capable d'entraîner un alternateur. Ces systèmes présentent un temps de restitution relativement lent mais les faibles pertes permettraient un stockage de longue durée. De nombreuses expériences sont menées afin d'améliorer les performances de ce système (Hedegaard & Meibom, 2011).

Enfin, il existe des systèmes de pompage hydro-électrique permettant de consommer l'électricité produite pour élever de l'eau en haut d'une cascade qui produira ainsi l'énergie

cinétique nécessaire à un générateur. Ces systèmes n'existent qu'à très grande échelle dans des sites où la topographie se prête. Ils présentent un encombrement important puisque deux bassins de stockage de l'eau sont nécessaires à leur fonctionnement (Rahman et al., 2011).

LES SYSTEMES ELECTRIQUES

L'un d'eux utiliserait des super-condensateurs qui seraient cryogénés sous leur température critique pour maintenir leur niveau de charge. Ce système n'entraînerait pratiquement aucune perte et permettrait le stockage à long terme. Les super-condensateurs devraient cependant être maintenus dans des frigos à hélium liquide isolés par le vide, processus excessivement énergivore. La technique n'est donc à ce jour pas encore au point (Rahman et al., 2011).

Un autre procédé se basant sur le transfert d'électricité au moyen d'une pompe à chaleur et de deux stockages thermiques, l'un froid et l'autre chaud, est actuellement en cours d'expérimentation. L'électricité serait exploitée pour extraire la chaleur du réservoir froid et la transmettre au réservoir chaud (principe de la pompe à chaleur). Le processus inverse serait employé pour restituer l'électricité. Les phases de compression et de détente du fluide entraînent cependant un taux de pertes élevé (White et al., 2012).

LES SYSTEMES CHIMIQUES

Par un processus d'électrolyse, l'énergie électrique pourrait également être transformée en énergie chimique. Il s'agit là d'un système de stockage par pile à combustible exploitant de l'hydrogène sous pression. Au lieu de servir à produire de l'électricité, ce système serait ici utilisé pour la stocker (White et al., 2012).

5.2.5 CONCLUSIONS

Pour bénéficier de conditions de confort similaires à une habitation raccordée au réseau électrique, il convient d'effectuer une étude approfondie des systèmes et de leur potentiel sur site. Cette étude doit reposer sur des volets énergétique, mais également économique et environnemental (Filloux, 2010).

Il ressort du chapitre précédent que les dispositifs de production éolien et photovoltaïque sont les seules technologies suffisamment mûres, tout du moins pour le moment, pour produire de l'électricité à échelle domestique en site isolé. Concrètement, une installation qui n'exploite que le photovoltaïque ne peut être, à ce jour, un investissement rentable compte tenu de l'ampleur de l'installation par rapport à sa durée de vie (Vanderstadt, 2011). On remarque par contre que le vent et le soleil sont deux sources d'énergie qui se complètent parfaitement. Lorsque le soleil est absent, le vent n'est jamais loin et il n'est pas rare qu'il souffle la nuit. En hiver, il y a souvent plus de vent que de soleil. Finalement, rares sont les journées, en France, où il n'y a ni soleil, ni vent. C'est pourquoi la combinaison du solaire et de l'éolien constitue l'assemblage parfait pour les sites isolés. Nous nous dirigerons donc vers cette solution hybride. Les conditions de site détermineront la contribution de chacun de ces deux dispositifs (Blugeon, 2011).

A cause de leur variabilité et du déphasage de leur production, ces systèmes ne peuvent cependant fonctionner seuls et doivent être systématiquement couplés à un parc de batteries, seul dispositif actuellement envisageable à l'échelle domestique. Leur seront également ajoutés des équipements connexes permettant une gestion judicieuse et adéquate de l'installation. Le schéma suivant reprend chacun de ces équipements et illustre leur utilité.

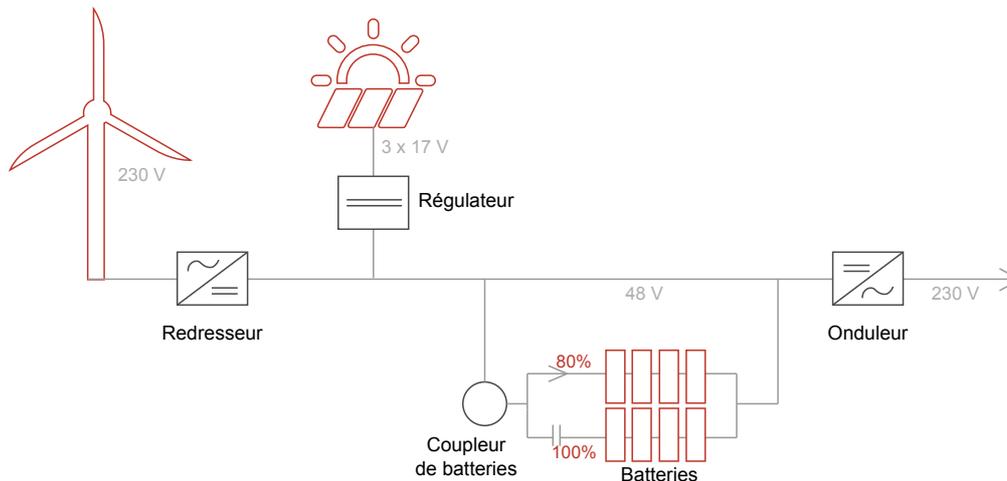


Figure 50: Installation de production électrique éolienne et photovoltaïque (réalisation : Monaco, 2012)

Malgré cela, l'installation ne peut être économiquement intéressante que si les besoins en électricité ont été préalablement évalués et minimisés. La puissance spécifique (W/m^2) produite par le photovoltaïque et, dans une autre mesure, par l'éolien est faible et l'usage thermique de l'électricité ainsi produite est à proscrire (Filloux, 2010). Il convient donc d'étudier et d'adopter d'autres systèmes pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, et d'ajuster sa consommation d'électricité. Ces aspects seront abordés dans les chapitres suivants.

5.3 ECLAIRAGE ET ELECTROMENAGERS

Depuis quelques années, la France, comme beaucoup d'autres pays, assiste à une dérive de la consommation électrique. Longtemps stabilisée, celle-ci augmente désormais de 2% par an. En cause, la multiplication des équipements électriques énergivores tels que les téléviseurs à grand écran et l'accroissement des systèmes de chauffage et de refroidissement électriques (Blugeon, 2010). Dans le cadre d'une production électrique décentralisée, il importe de s'interroger sur la manière de limiter cette surconsommation, voire simplement de l'éviter. Cela passe non seulement pas les équipements utilisés, mais également par un comportement responsable des habitants.

5.3.1 ECLAIRAGE

5.3.1.1 LES TYPES D'AMPOULES

LES LAMPES A INCANDESCENCE

Il y a quelques années encore, les lampes à incandescence et halogènes prédominaient sur le marché. Produite par l'échauffement d'un filament de tungstène grâce à un courant électrique, la lumière était de faible intensité, avec une efficacité lumineuse et une durée de vie réduites.

Les tubes fluorescents venaient compléter le panel de lampes disponibles sur le marché. Avec une durée de vie largement supérieure et une très bonne efficacité lumineuse, c'est leur encombrement et la qualité de leur rendu des couleurs qui limitaient leur utilisation dans l'habitat (De Herde & Liébard, 2005).

LES LAMPES FLUOCOMPACTES

Ces tubes fluorescents ont progressivement évolué vers les lampes fluocompactes qui possèdent les mêmes qualités (efficacité lumineuse, durée de vie élevée), mais dont les dimensions ont été réduites jusqu'à atteindre celles des lampes incandescentes. Désormais disponibles en plusieurs couleurs (chaude ou froide), et en plusieurs puissances, elles sont utilisées en remplacement de la lampe à incandescence. Comparativement, elles permettent une économie d'énergie de plus de 75%, raison pour laquelle elles sont connues sous l'appellation d'ampoules basse consommation.

Ces lampes pourraient néanmoins émettre des rayonnements électromagnétiques. Un avis de l'ADEME¹⁰ en 2009 fondé sur plusieurs études indique que leur utilisation est sans danger si elles sont placées à plus de 30 centimètres d'une personne. Contenant quelques milligrammes de mercure, un recyclage adapté est indispensable (Boudellal, 2011).



Figure 51: Lampe fluocompacte (source : google.com, 2012)

LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES (LED)

Les LED (Light-Emitting Diodes), qui ont envahi le marché ces dernières années, offrent également de nouvelles alternatives en matière d'éclairage. Grâce à leur taille très réduite, elles permettent toutes sortes d'intégration architecturale. Elles s'allument instantanément, possèdent une durée de vie très longue et n'émettent pas de rayonnement électromagnétique. Pour l'utilisation domestique, elles restent cependant relativement coûteuses et leur qualité est variable, influant sur leur durée de vie. Elles émettent également une grande quantité de chaleur qu'il faut pouvoir évacuer au moyen d'ailettes.

Une étude de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a mis en évidence que la composante bleue émise par la lumière d'une lampe LED pourrait présenter des risques pour la santé des enfants. Quoiqu'il en soit, les LED émettent une lumière ponctuelle très intense due à leur faible surface qui présente des risques d'éblouissement. L'utilisation d'un diffuseur est donc préconisée (Boudellal, 2011).



Figure 52: Lampe à diode électroluminescente (source : google.com, 2012)

¹⁰ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

L'ORGANIC LED (OLED)

De nombreuses technologies sont actuellement encore en développement. Parmi celles-ci, l'OLED semble être l'une des plus prometteuses. Contrairement aux LED classiques, elle est basée sur une émission de lumière par une surface importante, de plusieurs centimètres ou dizaines de centimètres carrés. Leurs dimensions et leur forme peuvent être très variées alors que l'épaisseur de l'ampoule n'est que de quelques millimètres. Un premier modèle est disponible sur le marché depuis 2010 (Boudellal, 2011).



Figure 53: Organic LED (source : google.com, 2012)

COMPARAISON DES PERFORMANCES

Le tableau suivant compare les performances des ampoules selon des valeurs moyennes. Notons que le remplacement d'une ampoule par une autre se base sur la comparaison du flux lumineux, exprimé en lumen. Celui-ci est le produit de la consommation électrique (en Watts) avec la puissance lumineuse (en lumen/Watt).

Type de lampe	Consommation (W)	Puissance lumineuse (lm/W)	Prix (€)	Durée de vie (heures)
Lampe à incandescence	60	15	4	1000
Lampe fluocompacte	15	60	8-10	5000
LED	12	50	25	25 000

Tableau 19: Comparaison des différents types de lampes domestiques (réalisation : Monaco ; source : Boudellal, 2010)

5.3.1.2 L'ECLAIRAGE DANS L'HABITATION

Dans le cas de notre habitation, le choix s'est porté vers des lampes basse consommation. Chaque pièce dispose d'une puissance lumineuse proportionnelle à l'activité qui s'y déroule. Les pièces de vie et les salles de bain sont donc logiquement les espaces qui requièrent les puissances les plus élevées. Le plan d'éclairage des locaux est disponible à l'annexe 8. Au total, 300 Watts seront nécessaires à l'éclairage de la maison mais la puissance réellement consommée sur une année ne sera calculée qu'au chapitre 5.3.4 *Consommation électrique* en fonction des durées d'utilisation.

5.3.2 ELECTROMENAGERS

5.3.2.1 PERFORMANCE DES ELECTROMENAGERS

La plupart des électroménagers actuellement sur le marché doivent s'accompagner de l'étiquette-énergie. Elaborée par l'Union Européenne, celle-ci résume les principales caractéristiques d'un produit, notamment ses performances énergétiques, afin de faciliter le choix entre les divers modèles.

Cette étiquette reprend au minimum quatre éléments. Tout d'abord, elle indique les références de l'appareil, à savoir le modèle et le fabricant. Elle précise ensuite la classe

énergétique, associée à un code couleur. Suivant le type d'appareil, il est également possible d'y lire la capacité, la consommation annuelle en eau ou encore la classe d'efficacité de séchage ou d'essorage. Elle renseigne enfin le bruit émis par l'appareil en décibels (dB).

Anciennement, la classe énergétique était notée de A (économe) à G (peu économe). Depuis fin 2011, les nouveaux produits mis sur le marché sont équipés de la nouvelle étiquette-énergie, indiquant les performances de A+++ (économe) à D (peu économe). Pour chaque équipement (congélateur et frigo, lave-linge et sèche-linge, lave-vaisselle,...), des valeurs seuils ont été établies dans des conditions types, permettant une juste comparaison entre les performances des différents produits (ADEME, 2012).

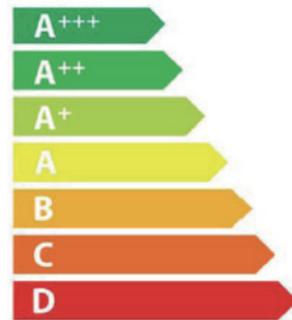


Figure 54: Nouvelle étiquette-énergie (source : google.com, 2012)

5.3.2.2 CHOIX DES EQUIPEMENTS

Vu la recherche d'autonomie dans laquelle nous cherchons à nous inscrire, il va de soi que les électroménagers doivent être sagement choisis. Ils constituent en effet pour la plupart des postes importants de consommation électrique, et il convient de favoriser l'utilisation d'appareils performants. Ceux-ci, tant pour la production de froid (frigo, congélateur) que pour le nettoyage (lave-linge, sèche-linge et lave-vaisselle) seront donc choisis parmi les équipements les plus performants. Il en ira de même pour les appareils auxiliaires tels que machine à café, grille-pain, four à micro-ondes, sèche-cheveux, rasoir électrique,...

Cependant, ce choix doit s'accompagner d'une remise en question quant au mode d'utilisation de certains appareils, à leur nécessité et au type de produit choisi.

LE TYPE D'EQUIPEMENTS

Pour chaque catégorie d'équipements, il existe sur le marché une multitude de produits présentant des performances parfois très variables. Il convient de le garder à l'esprit pour effectuer un choix pertinent. Les exemples repris ci-dessous montrent l'importance du type d'équipement choisi sur la consommation électrique.

LES ORDINATEURS

Les ordinateurs portables présentent des avantages indéniables tels que leur légèreté et leur faible encombrement, permettant de les transporter à notre guise. Mais ils ont également une faible consommation électrique par rapport à un ordinateur fixe. Ceci est vrai tant en fonctionnement qu'en veille. Dès lors, le choix d'un ordinateur portable, pour un usage privé, s'impose de lui-même. Le tableau suivant donne une idée des puissances nécessaires à chacun d'eux.

Type	Fonctionnement	Veille
Ordinateur portable	25-80 W	0,2 W
Ordinateur de bureau	100-450 W	2,5 W

Tableau 20: Comparaison entre les consommations d'un ordinateur portable et fixe (réalisation : Monaco ; source : Boudellal, 2010)

LES TELEVISEURS

A taille équivalente, les téléviseurs à écran plat LCD sont nettement plus économiques que les écrans plasma, mais les écrans traditionnels à tube cathodique, en fonctionnement, le sont encore davantage. Ce n'est par contre pas totalement vrai pour la consommation en veille, où les nouvelles technologies présentent de meilleures performances. De manière générale, la consommation électrique augmente logiquement avec la taille des écrans. Le tableau suivant illustre les consommations de chaque type d'écran (Boudellal, 2011).

Type	Fonctionnement	Veille
Ecran cathodique 82 cm	80-160 W	3-10 W
Ecran LCD 80 cm	100-150 W	0,4-6 W
Ecran plasma 94 cm	250 W	0,7 W

Tableau 21: Comparaison entre les différents types de téléviseurs (réalisation : Monaco ; source : curbain.be)

LES LAVE-LINGE ET LAVE-VAISSELLE

La principale consommation électrique de ces électroménagers est liée au chauffage de l'eau par la résistance électrique. Il existe néanmoins des modèles qui permettent d'alimenter l'appareil directement en eau chaude produite par des panneaux solaires. Ces systèmes sont bien plus économiques, mais se font relativement rares à l'heure actuelle. Avec le développement de l'énergie solaire, nous pouvons néanmoins espérer que ces produits se développent dans les années à venir (Boudellal, 2011).

LA NECESSITE DES EQUIPEMENTS

Certains équipements couramment rencontrés dans les ménages ne s'avèrent pas indispensables. Parmi eux, citons par exemple le four à micro-ondes. S'il fait aujourd'hui partie intégrante de nos habitudes alimentaires, son utilisation n'est pas nécessaire lorsqu'on dispose d'une cuisine munie d'une taque de cuisson et d'un four. De même, l'utilisation d'un sèche-linge est particulièrement pratique pour les pièces volumineuses telles qu'essuies de bain et draps de lit, mais elle ne s'avère pas capitale. En été ou à l'entre-saison, un climat chaud, sec et venteux se prête particulièrement à un séchage en plein-air. En hiver, une buanderie suffisamment grande permet de faire sécher les vêtements et il suffira d'ouvrir la fenêtre pour évacuer l'humidité. Selon l'usage qu'on en fait, il n'est pas non plus essentiel, par exemple, de disposer d'une imprimante à domicile, d'un grille-pain ou d'une machine à café.

LES EQUIPEMENTS DE CUISINE

Outre la nécessité de certains équipements, se pose également la question de leur source d'énergie. La plupart ne fonctionnent qu'au moyen d'une alimentation électrique et aucune alternative ne peut dès lors être envisagée. Ce n'est pas le cas de certains équipements de cuisine, tels que la taque de cuisson ou le four.

L'utilisation d'une plaque de cuisson vitrocéramique requiert une puissance d'environ 1200 à 2100 Watts et celle d'un four électrique classique, de 2000 à 2500 Watts ! Utilisés quotidiennement, ces équipements occupent une part importante dans la consommation totale annuelle en électricité d'un foyer et il est intéressant d'envisager des solutions alternatives.

LES ALTERNATIVES CLASSIQUES

Dans les coins les plus reculés de la France, nombreux sont ceux qui utilisent encore les cuisinières à bois. Très économiques, ces systèmes présentent l'inconvénient de devoir être régulièrement rechargés, leur capacité étant limitée. Il existe des cuisinières classiques, ou avec bouilleur, dont la chaleur est réutilisée pour le système de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. En été par contre, la chaleur dégagée peut s'avérer très inconfortable. Certains modèles fonctionnent au bois mais d'autres, plus récents, sont à pellets. Ces systèmes ne sont cependant plus très répandus car ils ne sont plus adaptés aux modes de cuisine actuels. Il s'agit en effet d'un procédé lent, tant au niveau du lancement du dispositif que de la cuisson elle-même (Aubert, 1999).



Figure 55: Cuisinière à bois (source : Boudellal, 2010)

A l'heure actuelle, la gazinière a largement remplacé ce système. Davantage répandue en ville où le gaz est distribué par le réseau public, elle s'avère également très pratique dans les habitats autonomes. Selon la capacité de la bouteille et l'usage que l'on en fait, celle-ci peut durer plusieurs mois. Le gaz naturel n'est cependant pas une énergie renouvelable. L'idéal serait probablement une cuisinière à biogaz, mais ce genre de dispositif n'a malheureusement pas encore vu le jour.

LES ALTERNATIVES MARGINALES

Certains systèmes, plus marginaux, ont également été développés ces dernières années, toujours dans un souci d'économie ou d'autonomie par rapport au réseau électrique. Il existe par exemple des cuiseurs solaires. Ceux-ci, en conditions optimales, permettent d'atteindre en France une température de fond de récipient de l'ordre de 200°C. Le temps de cuisson dépend du type d'aliment à cuire et des conditions d'ensoleillement, mais il faut compter au minimum 2 heures. De plus, puisqu'il dépend du soleil, il ne peut s'agir que d'un système d'appoint (Boudellal, 2011).

COMPARAISON DES DIFFERENTS MODES DE CUISSON

Il existe donc divers modes de cuisson qui peuvent être envisagés en alternative aux systèmes électriques, même si tous ne présentent pas la même garantie ni le même confort.

Type de cuisson	Eté	Hiver	Remarques
Electricité	Oui	(Oui)	Gros consommateur d'électricité
Bois	(Oui)	Oui	Cuisson lente, inconfort d'été
Gaz	Oui	Oui	Non renouvelable
Solaire	Oui	Non	Cuisson lente et aléatoire

Tableau 22: Comparaison des types de cuisson (réalisation : Monaco ; source : Boudellal, 2010)

5.3.2.3 LES VEILLES

Lorsqu'un appareil n'est plus utilisé, il suffit simplement à l'utilisateur d'appuyer sur le bouton d'arrêt. En principe, l'appareil est effectivement hors service. Mais si, par curiosité, nous plaçons un wattmètre à ses bornes, nous constaterons, la plupart du temps, une consommation électrique non nulle. L'appareil est à l'arrêt sans vraiment l'être, il consomme une petite quantité d'électricité (Sidler, 2012).

L'UTILITE DES VEILLES ET LEUR IMPACT SUR LA CONSOMMATION

C'est le problème de bon nombre d'équipements modernes. La plupart d'entre eux ne disposent plus d'un bouton d'arrêt, mais d'un bouton « stand-by » qui met simplement l'appareil en veille. Ces veilles représentent une consommation cachée, parfois utile mais pas toujours nécessaire. Elles servent, par exemple, à attendre un signal provenant d'une télécommande, afficher des informations rudimentaires (heure et date), maintenir une connexion permanente au réseau (pour les appareils Wi-Fi et Bluetooth) ou encore faire fonctionner des détecteurs de sécurité (détecteur de fuite d'eau sur une machine à laver) (guidetopten.com, 2012). Pratiquement tous les équipements de l'habitation sont sujets à ces consommations. Par exemple, une taque de cuisson vitrocéramique reste constamment sous tension afin de réagir aux commandes digitales. Un ordinateur de bureau n'est véritablement éteint que si l'interrupteur situé derrière la tour a été enfoncé.

On estime que les consommations cachées de ces appareils, dans une habitation, peuvent dépasser les 60 Watts, c'est-à-dire une consommation de :

$$\text{Consommation} = 60 * 24 * 365 = 525\ 000 \text{ Wh soit } 525 \text{ kWh}$$

Il est donc essentiel, dans une habitation autonome, de pouvoir les cibler afin de les réduire (Sidler, 2012).

REDUIRE LES VEILLES

Puisque le simple fait d'appuyer sur le bouton d'arrêt d'un appareil ne suffit plus à supprimer sa consommation électrique, il convient d'adopter quelques réflexes.

Le premier réflexe à adopter est de débrancher tous les appareils qui ne sont pas utilisés : chargeurs d'appareils portables, ustensiles de cuisine, grille-pain, machine à café, brosse à dent électrique,... Ce n'est cependant pas possible pour tous les équipements, notamment ceux encastrés, dont la prise est peu accessible. Il est alors possible de placer l'appareil sur interrupteur. Cela peut s'avérer utile pour les lave-linge et sèche-linge. Lorsque la fonction regroupe plusieurs appareils utilisés simultanément, par exemple pour l'audiovisuel ou le domaine informatique, il peut être encore plus pratique de les brancher sur une barrette multiprise avec interrupteur que l'on éteint après l'usage. Aujourd'hui, il existe même des multiprises « intelligentes » qui coupent automatiquement l'alimentation lorsqu'un appareil n'est plus utilisé.

La plupart des appareils programmables disposent aujourd'hui d'une pile intégrée ou d'une mémoire qui permet de ne pas perdre les informations encodées. Si ce n'est pas le cas, la consommation en veille ne peut être évitée. Il convient alors de les choisir parmi ceux répondant aux nouvelles normes européennes pour lesquels la veille atteint une puissance maximale d'un Watt. A partir de 2013, cette imposition sera d'ailleurs diminuée à 0,5 Watt (Boudellal, 2011).

5.3.2.4 CONCLUSIONS

En conclusion, le choix des équipements est une étape délicate dans l'élaboration d'un projet d'autonomie. Il est important, lors de l'achat, de bien se renseigner sur les performances

énergétiques des différents produits et de les comparer. De plus, il est inutile d'être trop gourmand. L'objectif est de rationaliser sa consommation électrique. Cela n'implique pas nécessairement de faire fi de tous les comforts d'une habitation classique, mais d'effectuer des choix en toute connaissance de cause. Une habitation autonome ne peut se permettre de consommer sans compter.

Au-delà de la consommation instantanée des équipements, exprimée en Watts, la consommation rapportée au temps d'utilisation, exprimée en Watt-heure (Wh) doit également entrer en compte. Le choix final des équipements s'effectuera donc après avoir évalué la consommation totale annuelle de chaque équipement (cf. 5.3.4 *Consommation électrique*).

5.3.3 SENSIBILISATION DES OCCUPANTS

La production d'électricité in situ requiert bien évidemment l'attention toute particulière des habitants. Ceux-ci doivent être sensibilisés à l'impact de leur comportement sur leur consommation et investir dans des équipements économes s'avèrera totalement inutile si aucun effort n'est effectué de leur part.

Tout d'abord, les gaspillages doivent être évités. Il convient, par exemple, de toujours bien éteindre la lumière en sortant d'un local ainsi que d'éteindre les équipements qui ne sont plus utilisés. Les veilles ne peuvent également être réduites que si l'occupant prête attention à bien débrancher l'appareil après son utilisation.

La production décentralisée demande également de s'intéresser un minimum à la météo, afin de prévoir et d'adapter sa consommation en conséquence. Il s'agit d'une gestion qui peut s'avérer complexe selon l'installation, et dont les acteurs doivent se coordonner afin que l'habitation puisse fonctionner dans des conditions optimales.

5.3.4 CONSOMMATION ELECTRIQUE

A la lumière du chapitre précédent et moyennant quelques choix importants, nous allons pouvoir déterminer précisément la consommation réelle due aux équipements et à l'éclairage de notre ménage.

La consommation annuelle d'un ménage s'exprime en Watt-heure. Les Watts caractérisent la puissance instantanée nécessaire au fonctionnement d'un appareil, mais sa consommation réelle doit être rapportée au temps durant lequel il sera utilisé. Certains équipements, a priori peu puissants, s'avèrent en fait être de gros consommateurs car ils sont extrêmement souvent sollicités. C'est le cas, par exemple, du réfrigérateur et du congélateur. A l'inverse, certains d'entre eux requièrent une puissance importante mais, peu utilisés, présentent un faible impact sur la consommation totale. C'est le cas d'une imprimante notamment. Le Watt-heure permet en fait une juste comparaison entre des équipements de puissance variable.

On estime la consommation moyenne en électricité d'une famille française de quatre personnes à environ 3000 à 3600 kWh, hors chauffage et production d'eau chaude sanitaire (Boudellal, 2011). L'estimation que nous avons réalisée nous conduit à une consommation d'un peu moins de 2500 kWh (cf. tableau 23). La différence s'explique probablement par le fait que, dans notre cas, des équipements économes ont d'emblée été favorisés. Nous avons également considéré que les appareils non utilisés étaient systématiquement débranchés, n'entraînant pas de consommation en veille. Le détail des équipements considérés, de leur puissance et de leur consommation annuelle se trouve ci-dessous.

Appareil	Puissance (W)	Temps d'utilisation			Consommation (kWh)
		Min/jour	Jour/semaine	Semaine/an	
Eclairage rez-de-chaussée					
Salon	31,5	60	7	52	11,47
Cuisine	36	120	7	52	26,21
Local détente	22,5	40	7	52	5,46
Local technique	28	10	7	52	0,97
Cage d'escalier	13,5	10	7	52	0,82
Hall de nuit	4,5	5	7	52	0,14
Chambre à coucher	18	30	7	52	3,28
Sas d'entrée	9	5	7	52	0,27
Toilette	4,5	10	7	52	0,27
Extérieur	28	60	7	26	5,1
Eclairage étage					
Chambre 1	18	90	7	26	4,91
Chambre 2	18	90	7	26	4,91
Chambre 3	18	90	7	26	4,91
Salle de bain 1	27	60	7	52	9,83
Salle de bain 2	27	60	7	52	9,83
Hall de nuit	18	20	7	52	2,18
Buanderie	11	20	7	52	1,33
Electroménager cuisine					
Grille-pain	1000	4	5	52	17,33
Machine à café	1000	8	7	52	48,53
Four à micro-ondes	3000	10	5	52	130
Four électrique	2500	60	1	52	130
Plaque de cuisson	1500	60	7	52	546
Hotte	400	60	7	52	145,6
Frigo	90	220	7	52	120,12
Congélateur	90	300	7	52	163,8
Lave-vaisselle	2400	17	7	52	247,52
Equipement salle de bain et buanderie					
Machine à laver	2200	20	4	52	152,53
Sèche-linge	900	60	4	26	93,6
Fer à repasser	1100	30	5	52	143
Aspirateur	800	60	2	52	83,2
Sèche-cheveux	1800	15	3	52	70,2
Rasoir électrique	10	5	7	52	0,3
Appareils son/image					
Télévision	100	180	7	52	109,2
Radio	3	60	7	52	1,09
Radio réveil	3	1440	7	52	26,21
Ordinateur	100	180	7	52	109,2
Imprimante	350	15	7	52	31,85
Décodeur satellite	17	180	7	52	18,56
Sous-total Base					2476
Sous-total Maison					1577

Tableau 23: Consommation électrique annuelle pour l'éclairage et l'électroménager (réalisation: Monaco ; source : curbain.be, 2012 ; guidetopten.com, 2012 ; google.com, 2012)

Nous constatons que les gros appareils électro-ménagers, bien que choisis parmi les plus performants, constituent les consommateurs les plus importants. Dans notre cas, il convient donc, comme évoqué, de s'interroger sur leur nécessité.

L'un des postes les plus importants est celui réservé à la cuisine (plaque de cuisson et four). Or, nous savons désormais qu'il existe de nombreuses alternatives aux systèmes électriques. Dans l'habitation étudiée, nous favoriserons un système de cuisinière au gaz. Ce n'est certes pas une énergie renouvelable, mais il s'agit d'un système fiable, pratique, similaire au mode de cuisson électrique et qui peut être utilisé toute l'année. C'est à l'heure actuelle la meilleure alternative à la cuisine électrique. Grâce à cela, nous réduisons la consommation du ménage à un peu moins de 1900 kWh, ce qui correspond à une économie de 25% !

Tous les électroménagers d'une habitation conventionnelle ne sont pas indispensables. S'il est difficilement concevable de se passer d'un réfrigérateur, d'un congélateur ou d'un lave-linge, l'utilisation d'un sèche-linge peut être évitée vu les conditions géographiques et climatiques de l'endroit. En été, l'air chaud et sec permettra de faire sécher le linge à l'extérieur. En hiver, celui-ci séchera dans la buanderie, munie d'un extracteur d'air. Le four à micro-ondes peut également être supprimé, puisque les équipements de la cuisine permettent de pallier facilement à son absence. Nous constatons que le lave-vaisselle, en principe utilisé tous les jours, consomme lui aussi énormément. Dans une habitation de cette capacité, l'absence de ce type d'équipement pourrait néanmoins s'avérer extrêmement ennuyeuse, c'est pourquoi nous le laisserons en place. Il en va de même pour les petits équipements (imprimante, sèche-cheveux,...) de puissance élevée mais utilisés sur de courtes durées. Grâce à ces quelques « sacrifices », la consommation annuelle du ménage hors chauffage et production d'eau chaude sanitaire avoisine finalement les 1600 kWh. Nous effectuons ainsi une économie de plus de 35% par rapport au cas de base considéré.

Cette valeur doit cependant être complétée par les consommations liées à l'ensemble des équipements techniques qui seront mis en œuvre pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et les éventuels équipements de ventilation ou de refroidissement. Pour ce faire, il nous faut d'abord développer ces thématiques, avant de choisir les équipements adaptés.

5.4 VENTILATION ET REFROIDISSEMENT

5.4.1 VENTILATION

5.4.1.1 *ROLE DE LA VENTILATION*

La ventilation d'une habitation assure le renouvellement d'air afin de satisfaire à plusieurs objectifs : contenter le besoin en oxygène des habitants, évacuer la vapeur d'eau générée, limiter la pollution de l'air intérieur ainsi qu'améliorer le confort en éliminant odeurs et fumées (De Herde & Trachte, 2010).

Dans les maisons anciennes, le taux d'infiltration d'air au travers des parois était si grand qu'en général, aucune mesure particulière ne devait être prise, l'air de la maison se renouvelant de manière passive. Avec l'amélioration des performances thermiques des bâtiments et, par là, l'étanchéification de l'enveloppe, le renouvellement d'air ne peut plus s'effectuer. Il faut dès lors mettre en place des systèmes de ventilation dans l'habitation.

5.4.1.2 SYSTEMES DE VENTILATION

Il existe quatre types de ventilation, chacun étant nommé par une lettre de A à D.

		Alimentation	
		Naturelle	Mécanique
Evacuation	Naturelle	Système A	Système B
	Mécanique	Système C	Système D

Tableau 24: Les quatre types de ventilation (réalisation : Monaco, 2012)

La ventilation de type A est une ventilation naturelle. L'air extérieur entre dans l'habitation au moyen de grilles placées dans la façade ou dans les châssis, ou simplement en ouvrant les fenêtres. Les mouvements d'air sont ensuite induits dans l'habitation par des phénomènes naturels comme une différence de température, de pression de l'air, ou l'action des vents. De ce fait, aucun contrôle n'est possible sur les débits de renouvellement. Tout au plus, certains modes de conception architecturale peuvent favoriser ces phénomènes. Il n'est pas non plus possible d'intervenir sur la qualité de l'air entrant ou sur sa température.

Le système B est une ventilation simple flux qui consiste à introduire mécaniquement l'air dans l'habitation, et à l'extraire naturellement par le principe de cheminée. L'avantage, contrairement à la ventilation naturelle, est que l'air entrant peut être filtré et préchauffé. Par contre, il n'est pas toujours possible, principalement en rénovation, de favoriser une extraction verticale de l'air.

Le système C, également simple flux, consiste en l'amenée naturelle d'air et son extraction mécanique au moyen de ventilateurs. Il permet, comme pour le système B, un meilleur contrôle du taux de renouvellement d'air mais, au même titre que la ventilation naturelle, ne permet pas de préchauffer ou filtrer l'air entrant.

Le système D, appelé ventilation mécanique double flux ou ventilation mécanique contrôlée (VMC), permet un contrôle total de l'air entrant et sortant. Il est généralement couplé à un échangeur de chaleur assurant le préchauffage de l'air entrant. Cet échangeur peut être couplé à un puits canadien, conduite enterrée d'une trentaine de mètres préchauffant l'air grâce à l'inertie de la terre. Ce système permet une économie de chauffage de 5 à 10%. L'air entrant est également filtré afin d'en assurer la qualité, ce qui peut s'avérer particulièrement utile en milieu urbain. Il est cependant relativement complexe à mettre en œuvre, surtout dans les bâtiments rénovés, car il requiert l'utilisation de nombreuses gaines techniques (De Herde & Trachte, 2010). Dans le cas d'une habitation autonome, son gros inconvénient réside principalement dans le fait qu'il s'agit d'un poste important de consommation électrique. Même optimisé, le système peut consommer plus de 200 kWh par an.

Le tableau suivant reprend les principaux avantages et inconvénients de chaque système.

	Avantages	Inconvénients
Système A	<ul style="list-style-type: none"> › Consommation électrique nulle › Peu coûteux › Encombrement faible › Applicable à tous les bâtiments 	<ul style="list-style-type: none"> › Pas de contrôle, efficacité variable selon conception architecturale › Air entrant ni préchauffé ni filtré › Bruits de l'extérieur
Système B	<ul style="list-style-type: none"> › Air entrant préchauffé et filtré › Encombrement faible › Consommation électrique faible 	<ul style="list-style-type: none"> › Conception architecturale pour l'extraction
Système C	<ul style="list-style-type: none"> › Encombrement faible › Consommation électrique faible 	<ul style="list-style-type: none"> › Air entrant ni préchauffé ni filtré › Bruits de l'extérieur
Système D	<ul style="list-style-type: none"> › Air entrant préchauffé et filtré › Efficacité certaine › Système passif 	<ul style="list-style-type: none"> › Encombrement › Consommation électrique › Investissement

Tableau 25: Avantages et inconvénients des quatre types de ventilation (réalisation : Monaco, 2012)

Que l'on privilégie un système ou l'autre, le principe reste cependant le même : l'air qui entre dans l'habitation doit en sortir. Généralement, l'amenée d'air se fait par les locaux secs (bureau, chambres, salon,...) tandis que l'air est extrait dans les locaux humides (salle de bain, cuisine, buanderie, toilettes,...).

5.4.1.3 CHOIX ADOPTE

Suite aux interventions sur l'enveloppe du bâtiment, qui ont considérablement amélioré ses performances thermiques, nous pouvons nous questionner sur la nécessité d'une ventilation mécanique. Nous savons que, dans le cas d'une maison passive, l'enveloppe est tellement étanche qu'il n'est pas possible de se passer d'une ventilation double flux pour assurer le confort de l'habitat. Les maisons passives présentent un taux de renouvellement d'air par infiltration de $0,6 \text{ h}^{-1}$ sous un différentiel de pression de 50 Pascals, et des besoins en chauffage inférieurs à $15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$. En ce qui concerne les besoins en chauffage, nous sommes relativement loin de ce résultat, avec une valeur de $33 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$. Nous ne disposons par contre d'aucune information quant au niveau d'étanchéité du bâtiment. Celui-ci, bien qu'en partie lié aux besoins en chauffage, est difficilement quantifiable, à moins de réaliser des tests in situ. Nous savons cependant qu'il est relativement difficile d'atteindre la valeur imposée par le label passif, à moins de supprimer la quasi totalité des ponts thermiques. Nous savons également que le taux d'infiltration moyen, en Belgique, est de $7,5 \text{ h}^{-1}$ (De Meester, 2009). A la vue de ces valeurs et des besoins en chauffage, nous constatons que notre bâtiment présente des caractéristiques relativement éloignées du passif.

Au-delà des performances thermiques du bâtiment, d'autres paramètres sont susceptibles d'influencer le mode de ventilation à privilégier. En effet, la ventilation a pour principal objectif d'évacuer les pollutions internes du bâtiment. Or, il est possible de limiter ces pollutions. Les matériaux de construction sont pour beaucoup dans la qualité de l'air, c'est pourquoi nous avons privilégié des matériaux écologiques, sains et sans émission de polluants. Il s'agit de matériaux perméables à la vapeur d'eau qui, ajoutés au fait que le bâtiment est isolé par l'extérieur, ne devraient pas créer de condensation dans les parois. De plus, la pierre est un véritable régulateur hygrothermique, capable d'absorber la vapeur d'eau lorsque l'air est trop humide, et de la restituer lorsqu'il est trop sec. Le comportement des occupants jouera également un rôle dans la nécessité ou non d'une VMC. S'ils fument, utilisent des produits nocifs pour la santé (détergents, colles, peinture) ou ont des animaux de compagnie, l'air intérieur sera plus rapidement vicié (De Herde & Trachte, 2010). En principe, ce n'est pas le cas des propriétaires.

La conception architecturale influencera également notre choix. Le projet sur lequel nous travaillons a été conçu selon les principes bioclimatiques. Tout a été mis en œuvre afin de favoriser une bonne ventilation naturelle, comme de nombreuses ouvertures sur des façades différemment exposées, un effet cheminée grâce à la baie de toiture, une possible ventilation des locaux humides,... Grâce à ces précautions, il sera possible de favoriser une ventilation nocturne intensive durant les mois d'été. Nous pouvons dès lors nous interroger sur la rentabilité d'une ventilation mécanique qui ne serait utilisée que pendant l'hiver.

Enfin, le climat extérieur hivernal est également déterminant. L'air extérieur n'est vraiment froid qu'une petite partie de l'année. Favoriser une ventilation naturelle en hiver entraîne une augmentation des besoins en chauffage de $3 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$. Certes, cela représente 10% des besoins totaux, mais il est bon de rappeler que nous nous trouvons dans un contexte bien particulier. Une légère augmentation des besoins en chauffage est peu préjudiciable à la faisabilité du projet, alors qu'une augmentation substantielle de la consommation électrique due à la mise en place d'une ventilation mécanique pourrait s'avérer nettement plus gênante, sa consommation annuelle étant estimée à 262 kWh .

Forts de ces constatations, il semble finalement qu'une ventilation naturelle puisse largement assurer le confort de l'habitation. Nous placerons cependant des châssis munis de grilles de ventilation et des ventilateurs d'extraction dans les pièces humides telles que les salles de bain et la buanderie. Dans la cuisine, la hotte remplira ce rôle. Leur consommation électrique, relativement faible, sera bien évidemment prise en compte dans le calcul de la consommation annuelle globale.

5.4.2 REFROIDISSEMENT

Bon nombre des équipements de climatisation actuellement sur le marché sont coûteux et représentent de ce fait un investissement important. Ils ont, pour la plupart, un impact négatif sur l'environnement suite à l'effet de serre causé par l'évaporation inévitable dans l'atmosphère des fluides réfrigérants employés. De plus, ces équipements sont de gros consommateurs d'électricité (Salomon & Aubert, 2004). Même dans un climat comme celui de la Drôme, la climatisation d'une habitation peut être abandonnée au profit d'un rafraîchissement naturel si l'habitation est bien conçue.

Le premier réflexe pour assurer le confort d'été d'une habitation est d'empêcher autant que possible la chaleur d'entrer. L'isolation de l'enveloppe joue ce rôle. Cependant, si la chaleur parvient tout de même à entrer, son effet se renversera et l'habitation se transformera en un véritable thermo. D'autres dispositifs doivent donc être mis en œuvre conjointement à l'isolation. Nous savons que les baies constituent généralement l'un des points faibles de l'enveloppe, c'est pourquoi l'usage de protections solaires est inévitable. Nous avons opté pour des stores vénitiens extérieurs à lames orientables. Ce système permet de se protéger du rayonnement solaire tout en permettant une vue vers l'extérieur.

Il reste cependant inévitable que l'air intérieur s'échauffe sous l'action d'un soleil de plomb. La capacité des parois à absorber la chaleur va dès lors jouer un rôle significatif dans la limitation des surchauffes. En effet, l'habitation possède, grâce à ses matériaux constructifs, une très forte inertie qui va permettre de réguler la chaleur interne. Aux moments les plus chauds, le matériau va absorber la chaleur sans s'échauffer, et il la restituera avec plusieurs heures de déphasage, lorsque la température externe sera moins élevée et que l'émission de chaleur sera moins préjudiciable au confort. Le système de ventilation nocturne intensive mis en œuvre au sein de l'habitation, dont nous avons déjà parlé plus d'une fois, permettra le refroidissement de l'air pendant la nuit. Là encore, l'inertie joue un rôle capital puisque les murs, tout au long de la nuit, vont se refroidir. Au même titre qu'ils restituent leur chaleur avec un déphasage, ils restitueront leur fraîcheur durant la journée, limitant l'élévation de température intérieure.

Grâce à l'ensemble de ces mesures, nous estimons qu'il est possible de se passer d'un dispositif de climatisation dans l'habitation sans porter préjudice au confort estival. Nous réalisons désormais clairement toute l'importance de la phase de conception exposée au début de ce travail (cf. 3 *Interventions architecturales*).

5.5 CHAUFFAGE ET EAU CHAUDE SANITAIRE

5.5.1 INTRODUCTION

Le rôle d'un système de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire est de produire de la chaleur. Cette chaleur peut être produite par divers moyens, comme par exemple avec de l'électricité. De nombreux systèmes de chauffage (convecteurs, accumulateurs) et de production d'eau chaude sanitaire (résistance électrique) exploitent cette source d'énergie,

qui connaît d'ailleurs un essor considérable dans les constructions neuves en France (Guedj, 2010).

Dans le cadre de ce travail, ces systèmes sont à proscrire. Tout d'abord à cause des difficultés de production et de stockage de l'électricité, que nous avons abordées précédemment, mais aussi parce qu'il existe de nombreuses alternatives permettant de minimiser voire d'éviter toute consommation électrique pour ces postes. Ce chapitre a pour objectif de présenter ces systèmes pour au final adopter celui qui s'adaptera le mieux au contexte de l'habitation. La démarche s'inscrit toujours dans une démarche durable, c'est pourquoi nous n'envisagerons que les dispositifs exploitant les énergies renouvelables. Une fois ces éléments dimensionnés, nous pourrons en évaluer la consommation électrique, utile à la suite du travail.

5.5.2 LES SYSTEMES EXPLOITANT LES ENERGIES RENOUVELABLES

5.5.2.1 LE BOIS

LE BOIS COMME ENERGIE RENOUVELABLE

Le bois est une énergie renouvelable, à condition que la forêt exploitée se situe à proximité et soit gérée durablement. On estime qu'au-delà de 50 kilomètres, l'intérêt énergétique et environnemental devient difficilement justifiable. Contrairement à certaines idées reçues, le bois ne contribue pas à l'effet de serre puisqu'en brûlant, il dégagera la même quantité de CO₂ qu'il aura absorbée durant sa vie (Filloux, 2010).

La bûche est la forme la plus exploitée du bois. Elle présente l'avantage de pouvoir être produite par le particulier mais exige un grand nombre de manipulations, tant pour sa production (débitage, séchage) que pour sa combustion (recharges fréquentes). L'humidité des bûches doit être contrôlée et ne pas dépasser 25% pour que la combustion soit efficace. Il existe aujourd'hui d'autres matériaux, à base de bois, pouvant être valorisés et qui offrent de meilleurs rendements, principalement car leur taux d'humidité ne dépasse pas 10%.

Les plaquettes sont des copeaux de bois obtenus par déchiquetage d'arbres, branches ou sous-produits de l'industrie du bois. Leur prix est moins élevé que celui des bûches mais, pour la même quantité de bois, leur volume est deux fois supérieur à celui des bûches. Elles sont cependant peu exploitées en France. Les granulés de bois, ou pellets de leur dénomination anglophone, sont la forme la plus récente du combustible bois. Il s'agit de petits cylindres de 6 à 8 millimètres de longs obtenus par compression et agglomération des sciures, sans additifs. Leur prix est supérieur à celui des plaquettes mais ils occupent un volume plus faible. De nombreux systèmes exploitent aujourd'hui ce produit qui permet, tout comme les plaquettes, une alimentation automatique des équipements, augmentant ainsi leur autonomie (Aubert, 1999).

LA COMBUSTION DU BOIS

Avant de s'intéresser plus en détail aux équipements de chauffage au bois et à leur efficacité, il est essentiel de comprendre le phénomène de combustion du bois. Simple en apparence, ce processus s'effectue en plusieurs étapes.

- Le séchage : même sec, le bois contient encore 15 à 20% d'humidité. Pendant la première phase de combustion, cette eau s'évapore en consommant de l'énergie.
- Le dégagement et la combustion des gaz : avec l'élévation de la température, les gaz combustibles vont s'échapper, se combiner à l'oxygène de l'air, s'enflammer et ainsi

produire de la chaleur. Les gaz non brûlés formeront des dépôts de goudron sur les parois de l'appareil.

- La combustion des résidus charbonneux : une fois tous les gaz échappés, il reste un résidu, le charbon de bois. Celui-ci devient incandescent et brûle à son tour, presque sans flamme.

Dans la pratique, ces étapes se chevauchent. Lors de la combustion du bois, il importe de veiller à ce que celle-ci soit la plus complète possible. Une combustion incomplète constitue non seulement un gaspillage, puisqu'une partie de l'énergie contenue dans le combustible n'est pas valorisée, mais c'est surtout une source importante de pollution. Les gaz imbrûlés contiennent en effet de nombreuses substances indésirables telles que des particules de goudron, des oxydes de carbone et d'azote. Le tableau suivant reprend les principaux polluants liés à une combustion incomplète du bois, accompagnés de leurs effets sur la santé.

Polluants	Effets sur la santé
Acroléine	Irritation des yeux, irritation de l'appareil respiratoire
Formaldéhyde	Maux de tête, irritation de l'appareil respiratoire, probablement cancérigène
Monoxyde de carbone (CO)	Mortel à concentration élevée
Composés organiques volatiles (COV)	Certains sont cancérigènes, causes de maladies respiratoires
Oxyde d'azote (NO)	Cause de maladies respiratoires
Dioxydes et furanes	Probablement cancérigène
Particules fines (poussières)	Maladies respiratoires, aggravation de l'asthme,...

Tableau 26: Principaux polluants de la combustion incomplète du bois (réalisation : Monaco ; source : Aubert, 1999)

Pour que la combustion soit complète, plusieurs conditions doivent être remplies simultanément. La température doit être supérieure à 800°C et de l'oxygène doit être fourni en suffisance durant tout le processus. La plupart des nouveaux systèmes possèdent un foyer revêtu d'un matériau réfractaire qui maintient une température élevée durant une période suffisamment longue, et disposent d'une chambre de combustion avec une arrivée d'air secondaire permettant de compléter le processus.

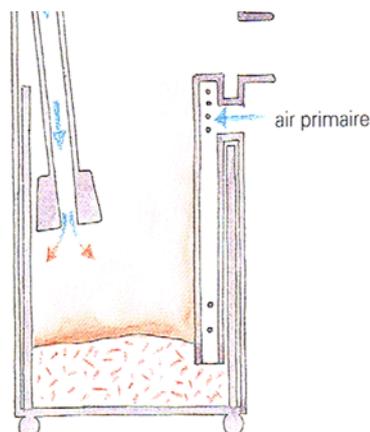


Figure 56: Foyer de combustion avec amenée d'air primaire et secondaire (source: Aubert, 1999)

Ces avancées ont permis d'augmenter considérablement le rendement des systèmes au bois et de diminuer l'émission de polluants (Aubert, 1999).

LES SYSTEMES DECENTRALISES

Anciennement, le chauffage décentralisé, de puissance réduite, était uniquement utilisé comme chauffage d'appoint, en renforcement d'un système de chauffage central. Aujourd'hui, les performances des bâtiments, notamment passifs, sont telles qu'un chauffage d'appoint peut suffire à chauffer l'entièreté d'une habitation durant les périodes les plus froides. Depuis toujours, bon nombre de ces systèmes décentralisés font appel au bois. Désormais, il existe autant de systèmes à pellets que de systèmes à bûches.

Grâce aux avancées décrites précédemment, l'efficacité des poêles et inserts à bois (émission de polluants et rendement) a largement augmenté. Les poêles à pellets atteignent un rendement de plus de 90%, contre 80% pour ceux à bûches. De plus, ils ne nécessitent pas de conduit d'évacuation des fumées, une ventouse murale pouvant suffire, et l'alimentation des pellets par une vis sans fin ainsi que la faible quantité de cendres permettent une autonomie plus grande, allant jusqu'à trois jours. Par contre, le dispositif d'alimentation et le ventilateur assurant la distribution de l'air chaud consomment un peu d'électricité, et l'espace de stockage intégré occupe un peu de place (Aubert, 1999).

Les poêles et inserts ne peuvent être valorisés que pour le chauffage. Ils sont généralement utilisés comme appoint seul mais, lors de rénovations, il est possible de les monter sur un circuit de chauffage central existant, en remplacement ou complément d'une chaudière, ou de faire circuler l'air dans d'autres pièces par des conduits. Leur conduit d'évacuation peut également être utilisé comme échangeur de chaleur. Par contre, en cas de ventilation mécanique, il est important de prendre garde à ce que les mouvements d'air induits n'entrent pas en conflit, ce qui pourrait créer des désagréments pour la santé et le confort des habitants (Guedj, 2010).

LES SYSTEMES CENTRALISES

Il existe des systèmes de chaudière à bûches et à plaquettes ou granulés. Les chaudières à bûches présentent les mêmes inconvénients que les poêles et inserts. Elles doivent être régulièrement rechargées et présentent un rendement qui ne dépasse pas les 80%. Les récentes chaudières à granulés ou à plaquettes sont, par contre, aussi simples d'utilisation que les chaudières à fuel ou à gaz. Contrairement aux chaudières à bûches, elles fournissent de la chaleur de manière très régulière grâce à leur régulation automatique (Aubert, 1999). Elles sont approvisionnées automatiquement avec une autonomie qui peut s'étendre sur toute la durée de chauffe, en fonction de la demande de combustible et de la taille du stockage. Elles disposent également d'un système de décendrage automatique et atteignent un rendement d'environ 95%, sensiblement identique aux chaudières à fuel mais en valorisant un combustible deux à trois fois moins cher. Elles occupent cependant une place plus grande puisqu'elles sont couplées avec le dispositif d'alimentation de combustible.

L'avantage des chaudières à bois est qu'elles peuvent être utilisées tant pour le chauffage (radiateurs, chauffage par le sol) que pour la production d'eau chaude sanitaire. Elles sont de puissance modulable et il en existe désormais à faible plage de puissance, adaptées aux bâtiments basse consommation (Guedj, 2010).

5.5.2.2 LE SOLAIRE THERMIQUE

LE SOLEIL COMME ENERGIE RENOUVELABLE

Au même titre que le soleil peut produire de l'électricité, il peut produire de la chaleur. Dans ce cas, ce n'est pas la lumière du soleil qui est valorisée, mais bien son rayonnement thermique. Pour évaluer le potentiel des panneaux solaires, il existe des cartes de gisement solaire élaborées selon la localisation géographique. Mais, tout comme pour le photovoltaïque, les performances réelles de l'installation dépendront tout d'abord du type de

matériel utilisé, de l'orientation des capteurs, de leur inclinaison, et des éventuels masques de l'environnement (Amet et al., 2010).

LES PANNEAUX SOLAIRES

Il existe plusieurs types de capteurs capables d'absorber l'énergie solaire. Tous se basent sur le principe général de l'effet de serre, L'objectif est de capter le rayonnement solaire et de l'emprisonner au moyen d'une vitre sous forme d'infrarouge afin de le transmettre à un circuit secondaire. Les différents types de panneaux n'ont cependant pas tous la même efficacité.

LE CAPTEUR PLAN

Le capteur plan est le type de capteur solaire le plus utilisé en Europe. Il s'agit d'un simple coffret isolant et étanche recouvert d'une vitre. A l'intérieur est posée une plaque métallique noire favorisant l'absorption du rayonnement solaire. Sur cette plaque se répartissent les tuyaux du circuit secondaire, qui vont transporter les calories récoltées vers un dispositif de stockage. Le rendement de ce type de panneaux est de l'ordre de 50% puisqu'une partie du rayonnement émis se perd par réflexion, transmission, convection et conduction dans l'air et les matériaux. Ces pertes sont proportionnelles à l'angle d'incidence des rayons, à la différence de température entre le panneau et l'environnement, au vent,... Lorsque toute l'énergie absorbée est perdue en échanges thermiques avec l'extérieur, on atteint la température de stagnation : le fluide ne circule plus dans le capteur. Le schéma suivant récapitule les différentes pertes.

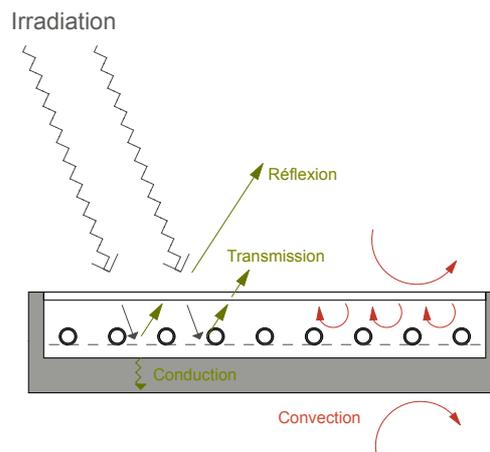


Figure 57: Pertes au sein d'un capteur solaire plan (réalisation: Monaco ; source : Amet et al.,2010)

LES CAPTEURS A TUBES SOUS VIDE

Les capteurs à tubes constituent la nouvelle génération de panneaux solaires thermiques. Il s'agit de panneaux composés d'une série de tubes transparents en verre, comprenant chacun un absorbeur et un échangeur. Ils sont mis sous vide pour mieux conserver la chaleur, évitant ainsi les pertes par convection au sein du capteur. L'absorbeur est également traité pour éviter les pertes par rayonnement. De plus, leur forme est telle que ces panneaux sont capables de capter le rayonnement solaire même lorsque son angle d'incidence (selon l'axe est-ouest) est élevé. Au final, on obtient des capteurs performants sans nécessiter de caisson et d'isolation supplémentaire.

Les tubes sous vide sont généralement annoncés comme étant nettement plus performants que les capteurs plans. En vérité, leur efficacité fait polémique. Il est à noter que la géométrie des capteurs (proximité des tubes qui se font de l'ombre, captage parfaitement identique à un capteur plan selon l'azimut, espace de captage entre les tubes perdu lorsque

le soleil est au zénith,...) n'améliore pas leurs performances en toutes circonstances. Il ressort des études qu'ils seront surtout bénéfiques lorsque l'installation ne peut se faire dans des conditions optimales d'inclinaison et d'orientation. Dans des conditions optimales, par contre, la différence de rendement est faible et ne justifie pas le surcoût engendré (Amet et al., 2010).

RACCORDEMENT DES CAPTEURS

La manière dont sont raccordés les panneaux entre eux va également influencer l'efficacité de l'installation. Il faut veiller à ce que le même débit traverse les capteurs, ce que permet le raccordement en série, mais en engendrant d'autres inconvénients. On constate en effet qu'au-delà de deux panneaux placés en série, non seulement les pertes de charge augmentent mais les panneaux en bout de files ont un très mauvais rendement, puisqu'ils doivent chauffer de l'eau déjà réchauffée.

L'une des meilleures manières d'optimiser l'installation est de placer les capteurs en parallèle et, puisque l'eau emprunte toujours le chemin le plus court, de faire en sorte qu'ils aient la même longueur. Ce principe est connu sous le nom de boucle de Tickelman. Il n'est cependant pas toujours possible de mettre ce dispositif en œuvre et, dans ce cas, l'installation devra faire l'objet d'une étude plus approfondie (Amet et al., 2010).

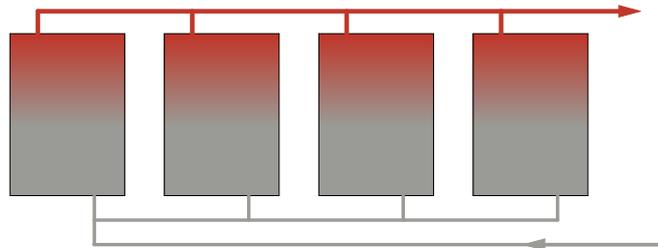


Figure 58: Boucle de Tickelman (réalisation: Monaco; source: Amet et al., 2010)

L'INSTALLATION SOLAIRE

Pour exploiter la chaleur récoltée grâce aux panneaux solaires, il faut les coupler à un ballon de stockage. C'est dans ce ballon que va s'effectuer l'échange thermique entre le fluide en provenance des panneaux et l'eau du ballon. Cette eau peut être utilisée tant pour l'eau chaude sanitaire que pour le chauffage. Néanmoins, dans le cas du chauffage, il faut envisager une alternative pour exploiter l'eau produite même en été, raison pour laquelle cette utilisation est encore peu répandue.

Si le stockage se situe au-dessus des capteurs, les mouvements naturels du fluide permettent de créer une circulation entre les éléments sans circulateur. Il s'agit d'une installation en thermosiphon. Le plus souvent, un circulateur s'avère néanmoins nécessaire pour forcer la circulation du fluide dans le circuit, régulée par des sondes de température. Cette petite pompe consommera donc un peu d'électricité.

Selon la localisation géographique, il est peu probable, ou en tout cas peu rentable, de produire la chaleur nécessaire uniquement grâce aux panneaux solaires. Il est donc important de prévoir un appoint, permettant de pallier à l'absence de soleil en hiver, voire même en été. Cet appoint peut être une simple résistance électrique, ou une chaudière à fuel, à gaz ou à bois (Riolet, 2010).

5.5.2.3 LA GEOTHERMIE

LA GEOTHERMIE COMME ENERGIE RENOUEVABLE

L'énergie géothermique est fournie par la chaleur interne de la terre. On remarque qu'elle augmente d'environ 3,3°C tous les 100 mètres (Filloux, 2010). A quelques mètres de profondeur seulement, celle-ci demeure à environ 8 à 12°C. A un ou deux mètres, les variations sont plus importantes puisqu'elles sont influencées par le rayonnement solaire et le ruissellement de l'eau de pluie, mais la température sera toujours supérieure à la température de l'air en hiver, et inférieure à celle de l'air en été. La géothermie repose sur l'exploitation de cette inertie du sol pour préchauffer ou rafraîchir l'air, selon la saison (Boudellal, 2011). A l'échelle domestique, on appelle ce principe la géothermie basse température.

Il existe plusieurs techniques permettant de tirer profit de la géothermie. Il peut s'agir d'un captage horizontal, appelé captage de surface, ou d'un captage vertical. Le captage horizontal repose sur un réseau de boucles, disposées horizontalement sur une grande surface à faible profondeur (0,6 mètre à maximum 2 mètres), dans lesquelles circule un fluide caloporteur. Ces boucles doivent être espacées d'au moins 40 centimètres pour éviter le gel permanent du sol. On estime l'encombrement total nécessaire à 1,5 à 3 fois la surface chauffée. Ce système occupe donc une grande surface d'installation. Le captage vertical requiert quant à lui un forage dans le sol dans lequel des sondes verticales remplies d'un fluide caloporteur sont scellées par du béton. Ce forage peut atteindre 100 mètres de profondeur pour un usage domestique. Les sondes peuvent capter la chaleur de la terre, ou celle d'une nappe phréatique qui serait emprisonnée dans le sol.

L'exploitation de la géothermie est complexe et une étude de site détaillée doit être effectuée avant de se lancer dans un tel dispositif. Cela nécessite de connaître la composition exacte du sol, ses caractéristiques mécaniques, la présence éventuelle de nappes d'eau, ..., toutes ces investigations présentant bien évidemment un coût (Schwartzenger, 2008).

LA POMPE A CHALEUR

Les pompes à chaleur géothermiques sont les équipements qui exploitent la géothermie. Leur objectif est d'opérer, grâce à un cycle thermodynamique, un transfert de chaleur à un circuit secondaire. Celle-ci pourra alors être utilisée à des fins diverses, généralement pour le chauffage.

Le cycle thermodynamique comprend 4 étapes. Dans l'évaporateur, le fluide caloporteur se trouve au départ à l'état liquide, à faibles température et pression. Mis en contact avec la source de chaleur externe, ce fluide s'échauffe au-delà de sa température d'ébullition et s'évapore, alors que la source de chaleur se refroidit de quelques degrés. Désormais sous forme de vapeur, le fluide caloporteur est mis sous pression dans le compresseur, alimenté par une source électrique. Suite à cette étape, le fluide est non seulement sous haute pression, mais cela provoque également une élévation de température importante. Il entre ensuite dans le condensateur où, mis en contact avec un circuit secondaire dont la température est plus faible que sa température de liquéfaction, il va se refroidir en cédant sa chaleur. Ce circuit secondaire est le circuit de chauffage, qui va ensuite être distribué dans l'habitation pour lui céder, à son tour, sa chaleur. Le fluide caloporteur va ensuite être détendu dans une soupape d'expansion où il va reprendre ses caractéristiques de pression et de température initiales afin que recommence le cycle (Hegger et al., 2011). Le schéma suivant illustre ce cycle thermodynamique.

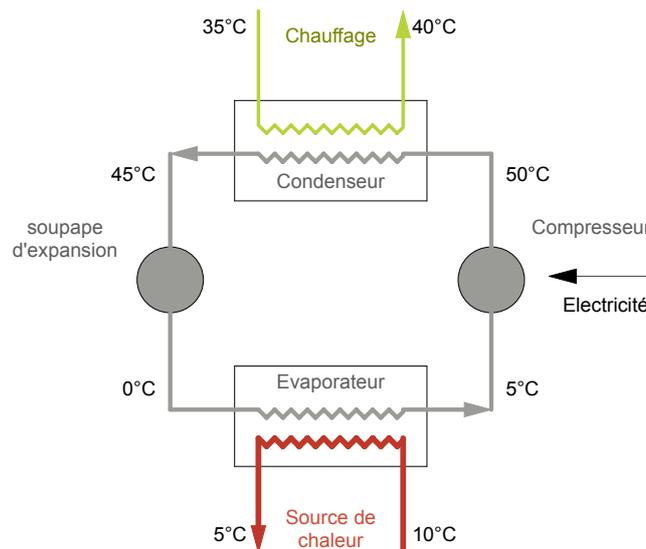


Figure 59: Principe de la pompe à chaleur (réalisation: Monaco; source: Hegger et al., 2011)

Les pompes à chaleur sont des systèmes de production basse température. Le fluide échauffé atteint une température maximale de 35°C. Cette chaleur peut être valorisée pour le chauffage par un plancher chauffant ou des radiateurs basse température. Elle peut également servir à la production d'eau chaude sanitaire, à condition qu'un système d'appoint élève ensuite l'eau jusqu'à 55°C. Il est à noter que les pompes géothermiques sont des pompes eau/eau mais il existe des pompes aérothermiques air/eau ou air/air qui exploitent les calories présentes dans l'air extérieur. Elles sont cependant moins répandues car leur efficacité diminue considérablement avec la température extérieure, ce qui oblige le plus souvent à utiliser un système d'appoint (De Herde & Trachte, 2010).

L'efficacité d'une pompe à chaleur se caractérise par son coefficient de performance (COP), qui renseigne la proportion d'énergie fournie par rapport à l'énergie consommée par le compresseur. Le COP varie généralement de 1,5 à 3. Malgré le fait que la consommation électrique est diminuée par la valorisation des calories du milieu, cet équipement consomme tout de même une quantité importante d'électricité. A priori intéressante, la pompe à chaleur s'avère finalement assez incompatible avec un habitat autonome (Boudellal, 2011).

5.5.3 LES SYSTEMES DE DISTRIBUTION

La qualité et l'efficacité d'un dispositif de chauffage et d'eau chaude sanitaire ne dépendent pas uniquement du mode de production choisi, mais également du système de distribution, et de la régulation de l'installation.

5.5.3.1 LE CIRCUIT DE CHAUFFAGE

A tout dispositif de production de chaleur doivent être couplés des dispositifs de distribution et d'émission. Le dispositif d'émission participe de manière intégrante au confort. Ce n'est pas la température de l'air elle-même qui conditionne ce confort, mais la température résultante, moyenne entre la température de l'air et celle des parois. Le rayonnement joue donc un rôle tout particulier dans la notion de confort, c'est pourquoi de nombreux systèmes émissifs se basent sur ce principe.

LE PLANCHER CHAUFFANT

Le plancher chauffant diffuse une chaleur homogène dont la distribution se rapproche des conditions de température idéale. Il provoque une sensation agréable au contact du sol et évite le déplacement de poussières, ce qui est bénéfique à la qualité de l'air intérieur. Pour une même sensation de confort, il permet un abaissement de température de 2°C et ainsi des économies d'énergie. Le corps de chauffe est invisible et offre un gain de place. Il fonctionne à basse température et peut être couplé avec de nombreux systèmes de production de chaleur comme une pompe à chaleur, une chaudière à fuel, à gaz ou à bois.

Les planchers chauffants sont très répandus dans les nouvelles constructions mais le sont moins en rénovation à cause de la surépaisseur que les tuyaux engendrent. Il faut toujours veiller à ce que la partie inférieure du plancher soit isolée afin de minimiser les pertes thermiques. Une épaisseur minimale de 3 centimètres et une isolation périphérique sont préconisées.

Le principal reproche actuel des planchers chauffants est le peu d'attention porté à l'environnement dans le choix des matériaux. On voit cependant apparaître de plus en plus de solutions proposant l'utilisation de matériaux écologiques tels que le liège pour l'isolation et du papier kraft hydrofuge pour la pose des tubes (Percebois, 2011).

LES RADIATEURS

Les radiateurs classiques fonctionnent principalement par rayonnement, mais une partie de leur puissance totale est tout de même émise sous forme de mouvements convectifs. Leur structure interne permet la circulation de l'eau chaude tout en multipliant la surface d'échange thermique au moyen d'ailettes. Ces systèmes fonctionnent à haute température et peuvent, eux aussi, être couplés à divers systèmes de production de chaleur, même si leur efficacité avec des pompes à chaleur, fonctionnant à basse température, est controversée.

Le dimensionnement d'un radiateur à eau s'effectue traditionnellement en considérant une différence de température entre l'entrée de l'eau dans le radiateur et sa sortie de 50°C. Si le radiateur est alimenté par une plus faible température, il faut considérer une différence de température de 30°C. Dans ces conditions, pour retrouver une puissance adaptée aux déperditions de la pièce, il faut augmenter la surface d'échange et donc, les dimensions des radiateurs. Ces dispositifs sont appelés radiateurs basse température. Ils occupent certes davantage de place, mais leur basse température permet la diffusion d'une chaleur douce et plus homogène, sans points chauds, qui participe au confort des habitants (Percebois, 2011).

5.5.3.2 LE CIRCUIT D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Des études montrent qu'une distribution d'eau chaude mal conçue peut entraîner d'énormes pertes de chaleur et, par là, augmenter la consommation d'énergie (Cheng, 2001). Pour éviter ces pertes, il convient de mettre en œuvre quelques principes simples.

Dans la mesure du possible, il convient tout d'abord de regrouper lors de la conception architecturale les points d'eau dans une seule zone de l'habitation, aussi près que possible du local technique. Le volume de stockage doit être adapté aux besoins de l'habitation. Il doit être placé verticalement de préférence car cette position permet une meilleure stratification de la chaleur, et doit être isolé afin d'éviter les pertes thermiques. La température de l'eau à l'intérieur du ballon doit être maintenue à 60°C afin d'éviter tout risque de développement de la légionellose. Il faut également veiller à limiter autant que possible la longueur des conduites et à bien les calorifuger (De Herde & Trachte, 2010).

5.5.3.3 LA REGULATION

Une bonne gestion des systèmes est un point incontournable pour faire des économies d'énergie en assurant le confort de l'habitation. La régulation du système de chauffage va permettre d'adapter celui-ci aux besoins réels des habitants, en s'adaptant à trois problèmes principaux.

LA REGULATION DU CHAUFFAGE

Les appareils de chauffage sont dimensionnés en fonction de la capacité maximale de production d'énergie afin d'assurer le chauffage durant les temps les plus froids. Le reste du temps, l'apport de chaleur doit être adapté à la demande. Pour alimenter le circuit de chauffage avec une température « mitigée », on réalise un mélange entre l'eau chaude qui arrive de la chaudière et celle provenant du circuit de chauffage, plus froide. C'est le rôle de la vanne mélangeuse à trois voies. Son principe de fonctionnement est basé sur la rotation d'un secteur entre trois positions, permettant l'alimentation en eau chaude exclusivement à partir de la chaudière, un mélange entre l'eau de la chaudière et celle du circuit ou encore, lorsqu'elle est fermée, l'utilisation exclusive du fluide du circuit qui, dès lors, se refroidit.

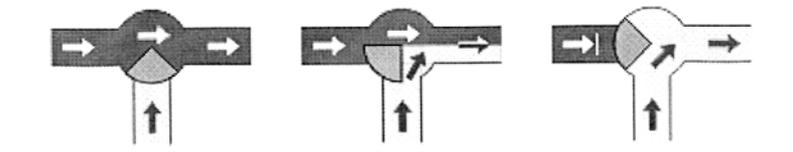


Figure 60: Principe de la vanne trois voies (source: energieplus-lesite.be, 2012)

La température extérieure varie en permanence. Pour s'adapter à ces variations, des systèmes de sonde vont commander le degré d'ouverture de la vanne trois voies en évaluant la différence entre températures intérieure et extérieure.

Enfin, il convient d'adapter la puissance fournie par le système de chauffage à la demande des locaux. Pour ce faire, il est possible d'utiliser un thermostat d'ambiance, qui régulera automatiquement le chauffage pour l'ensemble des zones qui ont les mêmes besoins. Lorsque la puissance doit être régulée de manière plus fine, en fonction des pièces par exemple, des vannes thermostatiques directement placées sur les corps de chauffe peuvent être utilisées à la place du thermostat.

L'utilisation de ces dispositifs permet jusqu'à 30% d'économie sur la facture annuelle de combustible, il est donc important d'y penser. Il s'agit cependant de composés électroniques qui consomment un peu d'électricité (energieplus-lesite.be, 2012).

LA REGULATION DE L'EAU CHAUDE SANITAIRE

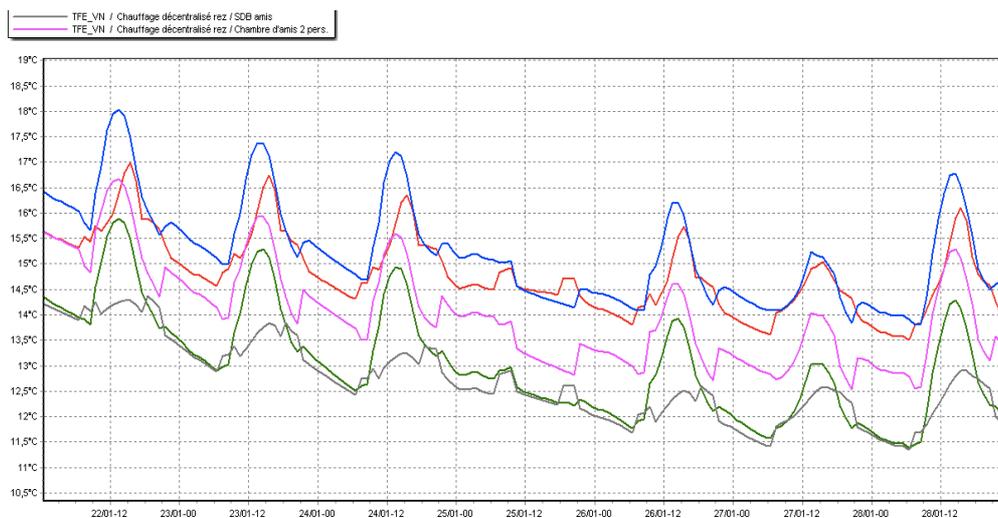
Le dispositif de production d'eau chaude sanitaire doit lui aussi être régulé. Dans le cas d'un chauffe-eau solaire, par exemple, la pompe ne doit faire circuler le fluide caloporteur que lorsqu'il est plus chaud en entrant dans le réservoir qu'en sortant. Pour ce faire, il est nécessaire de placer des sondes qui évalueront la différence entre la température du panneau et la température du réservoir pour actionner ou arrêter la pompe. Il existe également une option supplémentaire qui évalue la température maximale du ballon. Lorsque celle-ci a atteint sa température de distribution (55-60°C), quelle que soit la différence de température entre les sondes, le dispositif s'arrête. A l'inverse, lorsque le soleil ne peut chauffer suffisamment l'eau, il existe une option qui permet d'actionner systématiquement le système de chauffage d'appoint. Au même titre que pour le chauffage, la régulation constitue l'une des clés du rendement du système (Amet et al., 2010).

5.5.4 SOLUTION RETENUE ET DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

5.5.4.1 CHAUFFAGE

L'utilisation du programme Pleiades+Comfie nous a permis d'évaluer les besoins en chauffage de l'habitation ainsi que la puissance du corps de chauffe associée (cf. 3.4 *L'implémentation dans Pleiades+Comfie*). Ceux-ci sont valables pour un scénario annuel bien défini. Avant de nous prononcer sur le système de chauffage à privilégier et sa puissance, envisageons d'autres scénarii.

Dans un premier temps, évaluons l'influence d'un dispositif de chauffage à l'étage. Le diagramme ci-dessous montre l'évolution des températures dans les chambres et salles de bain durant la semaine la plus froide de l'année, du 22 au 28 janvier.



Graphique 8: Evolution des températures à l'étage en cas d'absence de chauffage (source : Pleiades+Comfie, 2012)

Nous constatons que, dans ce cas de figure, la température peut descendre jusqu'à 11,5°C dans ces locaux ! La température moyenne sur la semaine avoisine les 14°C, ce qui est largement insuffisant pour assurer le confort de l'habitation. Il est donc inconcevable de ne prévoir qu'un simple système de chauffage décentralisé qui se trouverait dans l'espace de vie. Même avec un système de distribution de l'air chaud, sa mise en œuvre, vu la géométrie de la maison, serait complexe. Nous nous dirigerons donc vers un système de chauffage centralisé.

Dans ces conditions, la chaudière à pellets s'impose d'elle-même. Comme nous l'avons vu, une pompe à chaleur consomme bien trop d'électricité pour une habitation autonome. Le chauffage au moyen d'énergie solaire fait appel à un dispositif d'appoint et entraîne des problèmes de variabilité de la chaleur produite qui complexifie les installations. Certes, la chaudière à pellets consomme un peu d'électricité pour assurer l'alimentation automatique en combustibles mais, par rapport à une simple chaudière à bois, elle s'avère nettement plus confortable.

L'avantage d'une chaudière à pellets est qu'elle peut être couplée à différents dispositifs d'émission de chaleur. Le plancher chauffant est indiscutable en matière de confort, mais complexe à mettre en œuvre lors d'une rénovation. Dans notre cas, nous avons vu que de gros travaux doivent être entrepris au niveau de la dalle sur terre-plein du rez-de-chaussée. La mise en place d'un hérisson drainant est parfaitement compatible avec un plancher chauffant, c'est pourquoi nous favoriserons ce dispositif. Il s'agit d'un système basse température mais, grâce à l'utilisation d'une vanne trois voies, les planchers chauffants

peuvent être alimentés par une chaudière à haute température. A l'étage, la situation est différente. Les chambres sont traitées comme une extension de l'espace de vie où il est possible de travailler, de se détendre,... Selon les préférences des occupants, les chambres doivent donc pouvoir être plus ou moins chauffées. Nous privilégierons ainsi la mise en place de radiateurs avec vannes thermostatiques indépendantes et ce dans l'ensemble des locaux de l'étage.

5.5.4.2 EAU CHAUDE SANITAIRE

Contrairement au chauffage, l'eau chaude sanitaire peut être facilement produite au moyen de l'énergie solaire. Nous privilégierons donc ce mode de production. Nous avons cependant montré que, pour les journées moins ensoleillées, un dispositif d'appoint est absolument nécessaire. C'est la chaudière à pellets qui remplira ce rôle.

En été par contre, la chaudière sera complètement éteinte et il est tout à fait possible que certaines journées nuageuses empêchent une production d'eau chaude sanitaire exclusivement solaire. Dans ce cas, rallumer la chaudière n'est bien souvent pas recommandé, l'appoint se fera donc au moyen d'une résistante électrique. Puisque nous cherchons à limiter la consommation électrique, nous devons dimensionner l'installation pour qu'elle fasse un minimum appel à cet appoint.

5.5.4.3 DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

LES PANNEAUX SOLAIRES

CONSOMMATION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Avant même de dimensionner l'installation solaire, nous devons connaître les besoins en eau chaude sanitaire du ménage. On estime qu'un ménage de 4 personnes consomme environ 200 litres d'eau chaude par jour (Amet et al., 2010). Dans un ménage moyen, nous savons qu'une personne consomme environ 140 l/j.pers dont 50 l/j.pers d'eau chaude sanitaire. Nous savons également qu'un ménage économe utilisant des toilettes à chasse consomme environ 90 l/j.pers. En conservant le même ratio, la consommation en eau chaude sanitaire s'élèvera à 32 l/j.pers. Notons que nous n'avons pas comparé la consommation d'un ménage moyen directement à celle de notre ménage car celui-ci consomme bien moins d'eau grâce à l'utilisation de toilettes sèches. Qu'ils utilisent des toilettes sèches ou non, les occupants d'un ménage économe consommeront 32 l/j.pers d'eau chaude sanitaire, puisqu'une chasse d'eau n'utilise que de l'eau froide. Le tableau récapitulatif est présenté ci-dessous. Cette valeur est à multiplier par le nombre d'occupants pour connaître la quantité quotidienne d'eau chaude sanitaire à produire. Comme le ménage se compose de 6 personnes, la quantité totale s'élèvera à 192 litres. Nous prévoyons donc un ballon d'eau chaude sanitaire de 200 litres.

	Ménage moyen	Ménage économe	Ménage étudié
Consommation totale (l/j.pers)	140	90	59
Consommation ECS (l/j.pers)	50	32	32

Tableau 27: Récapitulatif des consommations quotidiennes en eau des ménages (réalisation: Monaco, 2012)

DONNEES CLIMATIQUES ET STRATEGIE DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Le logiciel CalSol (2012) nous fournit l'ensoleillement direct irradiant une surface d'inclinaison et d'orientation donnée, en fonction du lieu. Afin de dimensionner l'installation, nous devons donc commencer par déterminer l'implantation des panneaux solaires.

En produisant l'eau chaude sanitaire du ménage au moyen de panneaux solaires thermiques, nous cherchons avant tout à éviter de devoir consommer de l'électricité. Cette électricité, nous l'avons vu, sera principalement consommée en été par la résistance électrique si l'installation ne suffit pas à produire l'eau chaude nécessaire. Nous devons donc dimensionner l'installation pour que la production estivale soit optimale. De ce fait, il est dans notre intérêt de favoriser une inclinaison faible des panneaux. La toiture, avec sa pente de 20°, se prête parfaitement à cet usage. Elle est orientée de 15° vers l'est (en prenant comme référence le sud) et bénéficie donc d'un relativement bon ensoleillement. Le logiciel fournit les valeurs mensuelles suivantes pour une irradiation directe sur une surface inclinée de 20° et orientée à 15° est.

Mois	Irradiation moyenne (kWh/m ²)	
	Mensuelle	Quotidienne
Janvier	31	0,99
Février	70	2,49
Mars	88	2,84
Avril	104	3,45
Mai	101	3,26
Juin	129	4,3
Juillet	161	5,2
Août	129	4,15
Septembre	111	3,71
Octobre	76	2,45
Novembre	41	1,36
Décembre	25	0,81
Total	1066	

Tableau 28: Irradiation moyenne pour une surface inclinée de 20° et orientée à 15° est (réalisation : Monaco ; source : logiciel CalSol, 2012)

Selon la Réglementation Thermique 2012, la période de chauffe dans cette zone climatique de la France s'étend du 28 octobre au 16 avril. Il nous faut donc couvrir l'ensemble des besoins sur une période s'étalant de mi-avril à fin octobre. Nous constatons cependant que le rayonnement du mois d'octobre est largement inférieur aux autres mois. Prendre cette valeur comme valeur critique dimensionnante entraînerait un surdimensionnement de l'installation, qui produirait pratiquement le double du nécessaire durant le mois de juillet. Nous prendrons donc comme valeur de dimensionnement la valeur directement supérieure, à savoir, assez curieusement, celle du mois de mai. Celle-ci s'élève à 3,26 kWh/m². Pour le mois d'octobre, nous considérerons que, suivant le climat extérieur, la chaudière sera rallumée un peu plus tôt dans la saison ou que la résistance électrique prendra exceptionnellement le relais.

DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES

Nous cherchons désormais à calculer la surface de panneaux qui permettra de subvenir aux besoins en eau chaude du ménage. Pour ce faire, nous devons d'abord déterminer la puissance nécessaire pour chauffer le ballon d'eau chaude. Celle-ci se calcule grâce à la relation suivante :

$$P = Q * \Delta T * C$$

où P est la puissance à fournir pour chauffer l'eau du ballon (W)

Q est la quantité d'eau à chauffer, à savoir le volume du ballon (litres)

ΔT est la différence de température entre l'eau arrivant dans le ballon et l'eau en sortant (°C)

C est un facteur de conversion des calories en Watts et vaut 1,16.

Nous connaissons la quantité d'eau à chauffer, qui a été fixée à 200 litres. La température de l'eau entrant dans le ballon est généralement fixée à 12°C car c'est la température moyenne annuelle de l'eau provenant du réseau d'alimentation publique (Amet et al., 2010). Dans notre cas, cette eau sera à température plus élevée puisqu'elle aura été préalablement stockée dans le réservoir d'appoint situé à l'intérieur de l'habitation (cf. 3.4.3 *Le groupe hydrophore*). Nous considérerons donc une eau de température d'entrée de 15°C. La température de sortie est usuellement fixée à 60°C, permettant d'éviter le développement de la légionellose. La différence de température s'élève dès lors à 45°C et nous pouvons calculer la puissance nécessaire pour chauffer l'eau du ballon :

$$P = 200 * 45 * 1,16 = 10\,440 \text{ W soit } 10,44 \text{ kW}$$

Avant de calculer la surface de panneaux nécessaire, il nous reste encore à déterminer le type de produit utilisé. Nous avons vu qu'en matière d'inclinaison, les performances des capteurs plans et des capteurs sous vide étaient sensiblement identiques. L'orientation étant très peu décalée par rapport au sud, nous pouvons supposer que l'investissement dans des capteurs sous vide ne serait pas vraiment rentable. Nous privilégierons donc des capteurs plans pour lesquels l'efficacité est de 50%. La surface de panneaux s'obtient finalement par la relation suivante :

$$S = \frac{P}{(E_c * \eta)} = \frac{10,44}{(3,26 * 0,5)} = 6,4 \text{ m}^2$$

- où S est la surface nécessaire de capteurs (m²)
 P est la puissance nécessaire pour chauffer l'eau (kW)
 E_c est l'ensoleillement critique (kWh/m²)
 η est le rendement des capteurs

Nous arrondirons cette valeur à 7 m². Avec cette surface, nous calculons pour chaque mois le taux de couverture repris dans le tableau suivant.

Mois	Taux de couverture
Janvier	34%
Février	76%
Mars	95%
Avril	112%
Mai	109%
Juin	140%
Juillet	174%
Août	140%
Septembre	120%
Octobre	82%
Novembre	44%
Décembre	27%
Taux de couverture annuel	80%

Tableau 29: Taux de couverture de l'installation solaire thermique (réalisation : Monaco, 2012)

Il apparaît donc que la chaudière à pellets s'avèrera indispensable durant certains mois, principalement en novembre, décembre et janvier, afin de fournir le complément de puissance.

LA CHAUDIERE A PELLETS

Suite à l'implémentation dans Pleiades+Comfie, le logiciel nous a fourni une puissance du corps de chauffe qui s'élève à 8065 Watts, soit environ 8 kW.

Comme nous venons de l'expliquer, la chaudière devra fournir une puissance complémentaire lorsque les panneaux solaires ne pourront chauffer l'entièreté de l'eau. La puissance à fournir par la chaudière pour le chauffage de l'eau sera maximale au mois de décembre, lorsque le taux de couverture de l'installation solaire est le plus faible, et s'élèvera à :

$$P_{ch} = (1 - 0,27) * P_{ECS} = 0,73 * 10,44 = 7,6 \text{ kW}$$

où P_{ch} est la puissance nécessaire de la chaudière pour compléter les panneaux solaires (kW)

P_{ECS} est la puissance nécessaire pour chauffer l'eau du ballon (kW).

Ces puissances ne doivent pas être additionnées car, dans la pratique, la chaudière alternera son usage en fonction des besoins. Elle produira soit la puissance nécessaire au chauffage de l'eau, soit celle nécessaire au chauffage de la maison. Lorsque la chaudière doit fonctionner pour les deux usages simultanément, il convient de lui indiquer un ordre de priorité. Sur le marché, les puissances de chaudière à pellets sont modulables. Il faudra donc opter pour une chaudière dont la plage de puissance moyenne avoisinera les 8 kW.

L'INSTALLATION FINALE

Le schéma suivant récapitule l'ensemble des équipements mis en œuvre pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage.

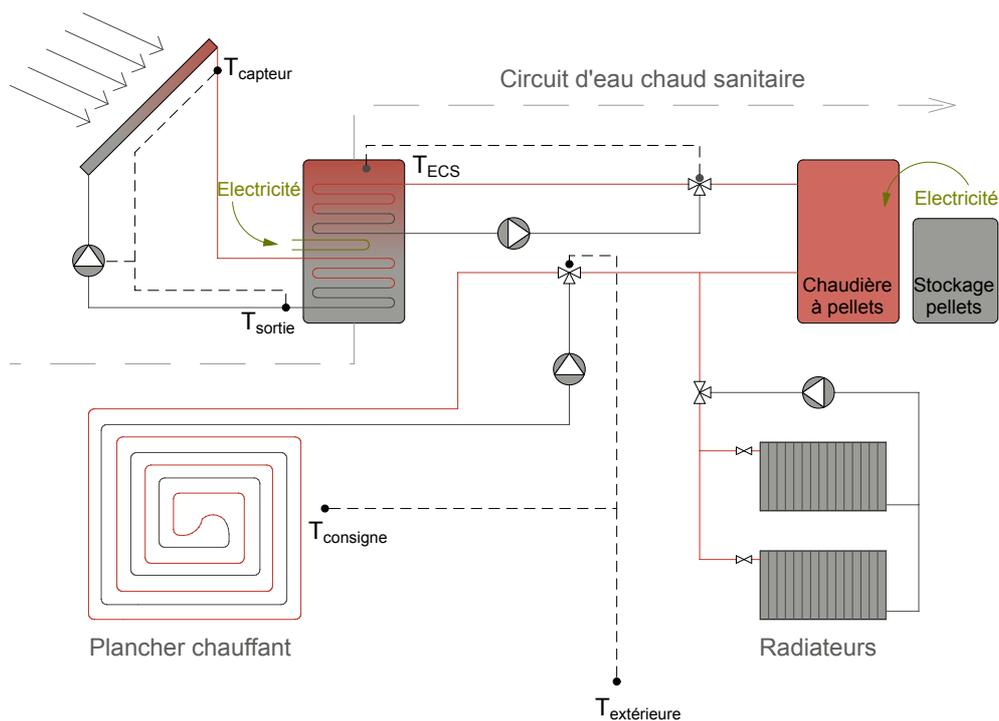


Figure 61: Schéma récapitulatif des dispositifs de chauffage et de production d'ECS (réalisation: Monaco ; sources: energie-plus-lesite.be, 2012 & Amet, 2010)

5.6 STRATEGIE ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

5.6.1 CONSOMMATION TOTALE EN ELECTRICITE

Nous connaissons désormais avec précision l'ensemble des dispositifs qui consommeront de l'électricité dans l'habitation et dans quelle proportion. Grâce aux nombreux choix effectués en vue de minimiser la consommation électrique, nous obtenons finalement une consommation totale annuelle de 2488 kWh. Cette valeur tient compte de la consommation engendrée par les équipements déterminés dans chacun des domaines que nous avons abordés :

- Le traitement de l'eau : l'aérateur de citerne et le groupe hydrophore,
- L'éclairage et les appareils électroménagers,
- La ventilation : 3 petits extracteurs pour les pièces humides et une hotte dans la cuisine,
- Le chauffage : l'électricité utilisée par la chaudière à pellets et les deux circulateurs,
- La production d'eau chaude sanitaire : le circulateur, la pompe des panneaux solaires thermiques et un éventuel appoint électrique.

La puissance des équipements ainsi que leur consommation annuelle ont été évaluées le plus précisément possible, en tenant compte de valeurs fournies par les fabricants. Le tableau détaillé des équipements, de leur puissance et de leur durée d'utilisation est fourni ci-dessous. Il servira de base au dimensionnement.

Appareil	Puissance (W)	Temps d'utilisation			Consommation (kWh)
		Min/jour	Jour/semaine	Semaine/an	
Sous-total Maison					1577
VMC	45	960	7	52	262,08
Extracteurs sdb 1	13	60	7	52	4,73
Extracteur sdb 2	13	60	7	52	4,73
Extracteur buanderie	13	60	4	26	1,35
Climatisation	2600	180	7	8	436,8
Poêle à pellets	200	120	7	52	145,6
Circulateur plancher ch.	50	1440	7	26	218,4
Circulateur radiateurs	50	960	7	26	145,6
Circulateur panneaux solaires	50	480	7	52	145,6
Circulateur ECS	50	300	7	52	91
Appoint électrique	1500	60	7	2	21
Groupe hydrophore	350	60	7	52	127,4
Aérateur citerne	5	180	7	52	5,46
Total Base					3187
Total Maison					2488

Tableau 30: Consommation électrique annuelle totale du ménage (réalisation : Monaco ; source : curbain.be, 2012 ; guidetopten.com, 2012 ; google.com, 2012)

5.6.2 ANALYSE DES DONNEES ET CHOIX DU MODE DE PRODUCTION

5.6.2.1 ANALYSE DU GISEMENT SOLAIRE

La France dispose d'un bon gisement solaire, avec une irradiation moyenne de 1500 kWh/m² sur l'ensemble de son territoire (Boudellal, 2011). Signalons, à titre de comparaison, qu'elle est de 900 à 1000 kWh/m² en Belgique (ef4.be, 2012). Ci-dessous est présenté un exemple de carte d'ensoleillement généralement rencontrée dans la littérature.

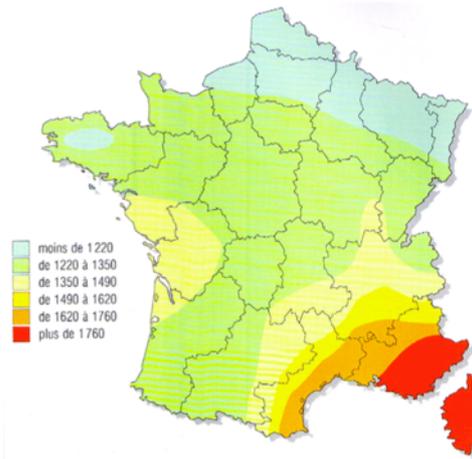


Figure 62: Carte du gisement solaire en France en kWh/m² (source : Blugeon, 2008)

Cette carte représente la quantité d'énergie solaire directe irradiant une surface d'un mètre carré orientée perpendiculairement au rayonnement. Cette grandeur est appelée gisement solaire. Il s'agit donc d'une valeur « de crête » qui doit être minorée par les conditions de l'installation photovoltaïque (inclinaison et orientation, ombrage,...). Nous constatons que la zone climatique dans laquelle se situe l'habitation, le sud-est, bénéficie de l'un des meilleurs taux d'ensoleillement du pays. Dans le cadre de ce travail, ces cartes ne sont pourtant pas exploitables puisqu'il s'agit de valeurs moyennes annuelles. Dans le cas d'une installation en site isolé, il nous faut affiner le dimensionnement. Celui-ci doit s'effectuer, tout au plus, sur base de moyennes mensuelles afin de pouvoir tenir compte des mois critiques, que sont les mois hivernaux, durant lesquels l'ensoleillement sera le plus faible.

Les données que nous utiliserons proviennent du Logiciel CalSol, qui évalue le gisement solaire d'une zone en fonction de sa position géographique, de son orientation et de son inclinaison. Afin de disposer de ces données, nous devons choisir la position des panneaux photovoltaïques. Deux réflexions principales vont guider notre choix : la surface de l'installation et son rendement.

Une installation en toiture est toujours privilégiée parce qu'elle offre de nombreux avantages tels qu'un faible encombrement, un impact visuel réduit et la protection des panneaux. Cette solution semble cependant peu pertinente dans le contexte qui nous occupe. Nous ne connaissons bien évidemment pas encore la surface totale qu'occupera l'installation photovoltaïque, mais nous pouvons déjà supposer qu'elle sera relativement importante, probablement quelques dizaines de mètres carrés. De plus, la surface disponible n'est pas idéalement positionnée puisque la pente est faible (20°) et orientée au sud-est. Ces conditions répondaient à nos attentes pour l'installation solaire thermique mais ne sont pas satisfaisantes pour un système photovoltaïque. Enfin, la toiture est en contrebas par rapport au volume voisin, ce qui risque d'entraîner une baisse significative du rendement de l'installation.

Nous opterons donc pour une pose au sol. De ce fait, il nous est possible d'orienter les panneaux vers le sud et de choisir leur inclinaison. L'installation sera dimensionnée par rapport au mois disposant du plus faible ensoleillement. Il s'agira d'un des mois de l'hiver, c'est pourquoi nous privilégierons une inclinaison élevée, permettant de capter au mieux le rayonnement hivernal. Etant donné l'intensité du rayonnement estival dans la région, nous pouvons être certains, même avec une inclinaison élevée, de subvenir aux besoins tout au long de l'année.

Après étude des valeurs fournies par le logiciel, nous fixons l'inclinaison à 55°, qui constitue un compromis entre le rayonnement capté et l'inclinaison. Ci-dessous se trouvent les valeurs mensuelles pour une surface orientée au sud et d'inclinaison 55°, comparées à celles d'une surface de même orientation et d'inclinaison 35°, jugée comme l'inclinaison « idéale » dans la région (Montélimar) car elle fournit l'irradiation annuelle la plus élevée.

Mois	Irradiation moyenne (kWh/m ²)	
	Sud, 55°	Sud, 35°
Janvier	46	39
Février	93	84
Mars	100	98
Avril	97	106
Mai	81	97
Juin	95	119
Juillet	123	151
Août	112	127
Septembre	117	120
Octobre	96	89
Novembre	59	52
Décembre	39	33
Total	1060	1116

Tableau 31: Comparaison du gisement solaire d'une surface idéalement inclinée (35°) avec une surface inclinée à 55° (réalisation : Monaco ; source : logiciel Calsol, 2012)

Nous constatons que le gisement solaire global est certes plus faible de 5%, mais le gisement solaire mensuel d'octobre à février est plus élevé, ce qui correspond bien à l'effet recherché. A titre indicatif, le logiciel fournit un gisement solaire de 1630 kWh/m².an pour une surface orientée perpendiculairement au soleil, valeur confirmée sur les cartes.

5.6.2.2 ANALYSE DU GISEMENT EOLIEN

De la même manière que pour le gisement solaire, il existe des cartes représentatives du gisement éolien annuel en France. Un exemple est fourni ci-dessous.

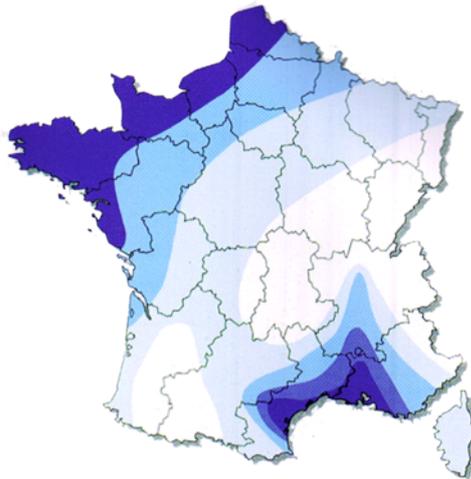


Figure 63: Carte du gisement éolien en France à une altitude de 50 mètres (source: Blugeon, 2008)

A nouveau, ces cartes ne fournissent aucune valeur utilisable dans le cadre de ce travail. Outre le fait qu'il s'agit d'une moyenne annuelle, certaines d'entre elles indiquent les vitesses des vents à une altitude de 50 mètres, ce qui s'avère totalement inutile pour le dimensionnement d'une éolienne domestique, plafonnant le plus souvent à 18 mètres de haut. D'autres ne précisent quant à elles simplement pas l'altitude. Dans les stations météorologiques, la vitesse des vents est normalement relevée à une altitude de 10 mètres, et dans des conditions de site bien particulières. Ces cartes manquent également d'une information capitale, à savoir la direction des vents dominants. Il nous faut donc nous mettre en quête de ces deux informations.

Avant d'aller plus loin, il est important de préciser que l'implantation d'une éolienne domestique nécessite normalement une analyse des vents in situ, à l'emplacement et à l'altitude précis du futur aérogénérateur, sur une période d'une année. Les conditions de site influencent en effet énormément l'orientation et la vitesse des vents. Dans le cadre de ce travail, nous allons nous contenter des données météorologiques de la ville de référence, Montélimar, et porter une réflexion sur les conditions de site afin de déterminer si elles semblent favorables ou non, et si les valeurs proposées paraissent réalistes.

Nous avons vu au début de ce travail (cf. 2 *Le projet – Présentation et objectifs*) que la région est sujette à deux vents principaux, le mistral et le marin. Le mistral est un vent caractéristique du climat provençal qui peut parfois souffler violemment. Il est froid en hiver et chaud en été, et s'accompagne d'un temps ensoleillé et sec. Il souffle en principe en direction du sud ou du sud-est. En provenance du sud, le marin est quant à lui un vent chaud et humide qui s'accompagne généralement de pluie.

La ville de Montélimar se situe dans le couloir rhodanien formé par la vallée du Rhône. A cet endroit, la vallée crée un véritable effet Venturi et les vents s'accroissent. On constate que Montélimar est de ce fait l'une des villes les plus exposées de la région, avec des pics de plus de 8 m/s (pratiquement 30 km/h) pendant 6% du temps. La ville est également sujette aux vents violents, avec des rafales dépassant 25 m/s (90 km/h) en moyenne cinq fois par an (Auffray et al, 2010). La ville possède donc, en principe, un bon gisement éolien mais il est difficile d'évaluer avec précision la pertinence des valeurs moyennes mensuelles de la vitesse des vents. Le plus souvent, nous ne disposons pas d'informations sur la station météorologique où elles ont été relevées. Les valeurs retenues fournissent une moyenne annuelle d'à peu près 5 m/s, ce qui paraît cohérent avec les observations réalisées. Le tableau suivant indique les moyennes mensuelles en m/s et en km/h.

Mois	Vitesse (m/s)	Vitesse (km/h)
Janvier	5,3	19
Février	5,6	20
Mars	5,3	19
Avril	4,6	16,7
Mai	4,6	16,7
Juin	4,6	16,7
Juillet	4,6	16,7
Août	4,6	16,7
Septembre	4,6	16,7
Octobre	4,6	16,7
Novembre	4,6	16,7
Décembre	4,6	16,7
Moyenne	4,8	17,4

Tableau 32: Vitesse moyenne mensuelle des vents à Montélimar (réalisation : Monaco ; source : windfinder.com, 2012)

La vitesse des vents semble relativement constante tout au long de l'année. Le tableau montre que les mois de janvier, février et mars disposent de vents plus puissants mais, ne connaissant pas les conditions du relevé, nous n'en tirerons pas de conclusions.

Outre la vitesse des vents, nous avons vu que leur direction avait également son importance. La rose des vents de Montélimar est fournie ci-dessous.

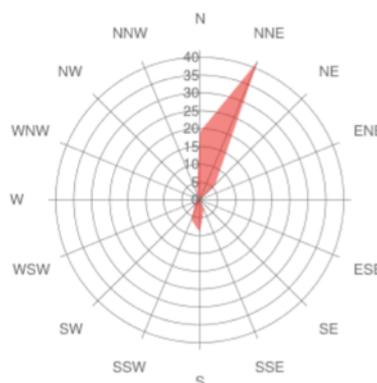


Figure 64: Rose des vents de la ville de Montélimar (source : windfinder.com, 2012)

Deux éléments importants peuvent être déduits de ce diagramme. Tout d'abord, nous constatons que la proportion du vent marin (en provenance du sud) est minime par rapport à celle du mistral (en provenance du nord). Nous observons également que, contrairement à la tendance avancée, le mistral ne provient pas de la direction nord-nord-ouest mais de la direction nord-nord-est, suite à la déviation entraînée par l'orientation de la vallée du Rhône.

Le site où se trouve l'habitation est relativement dégagé et pentu. Selon que le vent provienne d'une direction ou de l'autre, la topographie sera donc favorable ou non. La commune de Grâne se situe non loin de l'embouchure du Rhône et de la Drôme. Nous supposons donc que l'orientation et la répartition du vent est identique à celle de Montélimar et provient en abondance du nord-nord-est. C'est précisément la direction selon laquelle le site est dégagé. Seuls les arbres situés au loin seraient susceptibles de perturber les vents mais le relief est tel que, positionnés en contrebas, leur influence sera réduite. Certes, nous ne disposons pas de mesures in situ, mais nous pouvons conclure qu'a priori, le site présente des conditions favorables à la mise en place d'une éolienne. Les valeurs employées, présentant une vitesse moyenne de 17 km/h semblent tout à fait plausibles par rapport aux caractéristiques du site considéré.

5.6.3 DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS

Maintenant que nous avons une idée plus précise des conditions climatiques dans lesquelles s'inscrit le projet et que nous connaissons avec précision la consommation du ménage, nous pouvons élaborer une stratégie permettant de subvenir aux besoins des habitants. Dans ce but, le dimensionnement porte tant sur la complémentarité des installations éolienne et photovoltaïque que sur le dimensionnement des batteries et de l'onduleur.

5.6.3.1 SCENARIO CRITIQUE

Le principe général du dimensionnement repose sur l'élaboration d'un scénario critique. L'évaluation se fait sur une journée hivernale dont la demande électrique a été surévaluée et pour laquelle les conditions de production seront défavorables.

La demande de cette journée critique s'élève à 15,2 kWh (cf. annexe 9), c'est-à-dire plus du double d'une journée moyenne pour laquelle la consommation s'élève à :

$$D_{jm} = \frac{\text{Consommation moyenne annuelle (kWh/an)}}{\text{Nombre de jours dans l'année}} = \frac{2488}{365} = 6,82 \text{ kWh}$$

Cette demande critique représente la quantité d'électricité qui va être consommée par les équipements durant 24 heures. Le détail est consultable à l'annexe 9. Pour connaître la production critique, la demande doit être majorée par les pertes du système. L'onduleur, en transformant le courant continu en courant alternatif, a une efficacité d'environ 90%. Les batteries, lors du processus de décharge, ont également une efficacité estimée à 90% (Riolet, 2010). Nous ne connaissons pas avec précision la quantité d'électricité consommée sur la journée qui proviendra des batteries par rapport à celle fournie en direct. Elle dépend en effet de l'irrégularité de la production qui, par définition, est imprévisible. Par mesure de sécurité, nous considérerons donc que l'entièreté de la production électrique sera stockée dans les batteries avant d'être utilisée. La quantité réelle à produire s'élève donc à :

$$P_{jc} = D_{jc} * \frac{1}{\eta_{\text{onduleur}}} * \frac{1}{\eta_{\text{batteries}}} = 15,2 * \frac{1}{0,9} * \frac{1}{0,9} = 18,8 \text{ kWh}$$

où P_{jc} est la production journalière critique (kWh)

D_{jc} est la demande journalière critique (kWh)

η_{onduleur} et $\eta_{\text{batteries}}$ sont les rendements respectifs de l'onduleur et des batteries.

Cette production doit être satisfaite lorsque les conditions climatiques sont les moins bonnes. C'est le mois de décembre qui fournit les valeurs critiques dont nous tiendrons compte pour le dimensionnement. Pour ce mois, l'ensoleillement dans les conditions d'inclinaison et d'orientation précédemment évoquées s'élève à 39 kWh/m², ce qui équivaut à un ensoleillement critique quotidien sur une journée de :

$$E_{jc} = \frac{\text{Ensoleillement moyen du mois de décembre}}{\text{Nombre de jours en décembre}} = \frac{39}{31} = 1,26 \text{ kWh/m}^2$$

où E_{jc} est l'ensoleillement pour la journée critique considérée (kWh/m²).

En décembre, la vitesse moyenne du vent s'élève quant à elle à 4,6 m/s. Il ne s'agit pas véritablement d'une valeur critique puisque, bien qu'elle constitue la valeur minimale fournie, elle est identique durant neuf mois de l'année. C'est pourquoi nous allons minorer cette valeur afin de tenir compte d'une journée éventuellement moins venteuse que la moyenne. La plupart des éoliennes domestiques ont un seuil de déclenchement qui s'élève à 3 m/s. Adopter cette valeur comme valeur critique signifierait que l'on surdimensionne l'installation

car cela reviendrait à considérer que la production critique doit être assurée lorsqu'il n'y a ni vent, ni soleil. Or, les batteries servent précisément en prévision de ces journées. Nous décidons ainsi de considérer comme valeur critique de vitesse des vents la moyenne arithmétique entre le seuil de déclenchement et la moyenne sur le mois de décembre :

$$V_c = \frac{(V_{md} + V_d)}{2} = \frac{(4,6 + 3)}{2} = 3,8 \text{ m/s}$$

où V_c est la vitesse critique que nous considérerons (m/s)
 V_{md} est la vitesse moyenne de décembre (m/s)
 V_d est la vitesse de déclenchement de l'éolienne (m/s).

Armés de ces valeurs critiques, nous pouvons désormais nous attaquer au dimensionnement des dispositifs de production d'électricité.

5.6.3.2 DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

STRATEGIE DE PRODUCTION

Lors du dimensionnement d'équipements de ce type, il convient de tenir compte du taux de couverture des besoins. En site isolé, il va de soi que le taux de couverture total doit être de 100%, ce qui signifie que l'ensemble des besoins sera couvert par l'installation, dans les conditions définies ci-dessus.

Nous disposons de deux moyens de production d'électricité que sont l'éolienne et les panneaux photovoltaïques. Nous devons donc définir au préalable la proportion des besoins que couvrira chacun de ces dispositifs. Nous avons vu au chapitre précédent, traitant de l'analyse des données climatiques, que le site dispose d'un bon gisement solaire. Nous avons également déduit qu'il dispose très probablement d'un gisement éolien particulièrement favorable, vu sa situation géographique et sa topographie. Or, la puissance spécifique (W/m^2) produite par l'éolien est nettement supérieure à celle du photovoltaïque, ce qui signifie qu'à production égale, l'éolien est plus avantageux économiquement (Filloux, 2010). Quand c'est possible, il est donc préférable de favoriser la production éolienne.

Au vu de ces éclaircissements, il semble intéressant, dans notre cas, de privilégier la production éolienne. Ne disposant pas de la distribution réelle des vents in situ, nous allons cependant la limiter à un taux de couverture de 60%, contre 40% pour le photovoltaïque. Cela marque notre intention de favoriser autant que possible l'éolien, dans la limite de l'exactitude des données à disposition. Au final, seules des mesures réalisées sur site permettraient d'infirmer ou de confirmer ces suppositions.

LE DIMENSIONNEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE

Dans un premier temps, nous allons chercher à savoir quelle surface de panneaux photovoltaïques sera nécessaire pour couvrir 40% de la production journalière critique qui, rappelons-le, s'élève à 18,8 kWh.

Nous optons pour des panneaux de silicium polycristallins car il s'agit du meilleur rapport qualité/prix actuel. Leur rendement est compris entre 13% et 15%, nous considérerons donc une moyenne de 14%. Pour rappel, ce coefficient signifie que seuls 14% de l'irradiation thermique peuvent être transformés en électricité par les cellules photovoltaïques. Considérant un taux de couverture de 40%, la puissance électrique photovoltaïque à produire en une journée s'élève à :

$$P_{jc-ph} = \text{Taux de couverture} * \text{Puissance journalière critique} = 0,4 * 18,8 = 7,52 \text{ kWh}$$

où P_{jc-ph} est la production journalière critique produite par le photovoltaïque (kWh).

Finalement, la surface nécessaire de panneaux s'élève à :

$$S_{ph} = \frac{P_{jc-ph}}{(E_{jc} * \eta_{ph})} = \frac{7,52}{(1,26 * 0,14)} = 43 \text{ m}^2$$

où S_{ph} est la surface de panneaux photovoltaïques à prévoir (m²)

P_{jc-ph} est la production journalière critique produite par le photovoltaïque (kWh)

E_{jc} est l'ensoleillement d'une journée critique (kWh/m²)

η_{ph} est le rendement du panneau photovoltaïque choisi.

Pour un produit dont la puissance maximale délivrée est de 130 W/m², valeur réaliste pour un module en silicium polycristallin, il s'agit d'une installation d'une puissance de crête égale à :

$$P_c = P_m * S_{ph} = 130 * 43 = 5532 \text{ W}_c = 5,53 \text{ kW}_c$$

où P_c est la puissance de crête de l'installation (évaluée en Watt-crête indiqué W_c)

P_m est la puissance maximale produite par les panneaux (W/m²)

S_{ph} est la surface totale de l'installation photovoltaïque (m²).

Rappelons que la puissance de crête d'une installation représente la puissance maximale qu'elle peut délivrer sous l'effet d'une irradiation incidente « idéale » de 1000 W/m² et dans des conditions de température de 25°C. Cette valeur est donc représentative de l'efficacité théorique maximale des panneaux et ne tient pas compte des conditions de l'installation, ce qui permet une comparaison entre les produits. Elle est ici communiquée à titre indicatif, puisque nous n'effectuerons pas de choix précis quant au produit à mettre en place.

LE DIMENSIONNEMENT DE L'ÉOLIEN

Avant même d'envisager le dimensionnement d'une éolienne, il est important de rappeler quelques notions de base. On estime que la puissance cinétique du vent balayant une surface se quantifie par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 = 0,625 * S * v^3$$

où P_v est la puissance du vent (W)

ρ est la masse volumique de l'air (kg/m³), égale à 1,225 kg/m³ dans des conditions atmosphériques de référence (température de 15°C et pression atmosphérique de 1013 hPa)

S est la surface perpendiculaire à la direction du vent (m²)

V est la vitesse du vent (m/s)

Nous avons vu précédemment qu'aucune éolienne ne peut capter l'intégralité de cette énergie et, qu'à l'heure actuelle, la quantité maximale récupérable plafonne au 16/27^{ème} de cette puissance : c'est la limite de Betz. Concrètement, cette valeur doit encore être diminuée en fonction du type d'éolienne, car toutes ne présentent pas la même efficacité.

Celle-ci se traduit par le coefficient de récupération théorique, différent pour chaque modèle, et représenté ici pour les configurations les plus courantes.

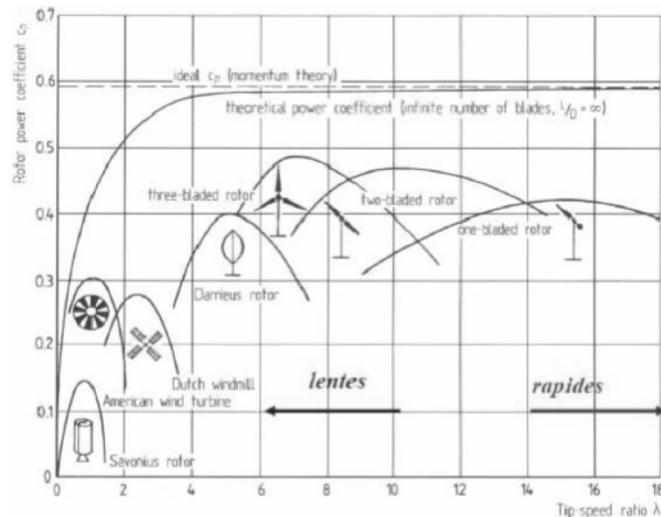


Figure 65: Coefficient de récupération limite selon le modèle de l'éolienne (source: Claessens, 2010)

Dans notre cas, nous favoriserons une éolienne tripale à axe horizontal car il s'agit des meilleurs produits actuellement disponibles sur le marché. Nous avons vu qu'elles sont capables de délivrer des puissances nettement supérieures aux éoliennes à axe vertical et qu'elles constituent, par rapport à leurs voisines bipales, un juste compromis entre puissance délivrable et seuil de déclenchement. Pour ce produit, le coefficient de récupération s'élève à environ 0,46.

La puissance théoriquement récupérable par cette éolienne s'élève donc à :

$$P_{e-th} = 0,625 * C_{r-th} * d^2 * v^3 = 0,625 * 0,4655 * d^2 * v^3 = 0,2851 * d^2 * v^3$$

où P_{e-th} est la puissance que peut théoriquement récupérer l'éolienne (W)

C_{r-th} est le coefficient de récupération théorique de l'éolienne

d est le diamètre du rotor (m).

Dans la pratique, nous constatons que les petites éoliennes ont une efficacité encore inférieure de 50% à cette valeur, lorsqu'elles fonctionnent à leur vitesse de production optimale, avoisinant généralement les 11 m/s. A vitesse inférieure, le coefficient de récupération doit encore être minoré. Ce phénomène est observable sur la courbe de puissance d'une éolienne, généralement fournie par le fabricant. En voici un exemple ci-dessous.

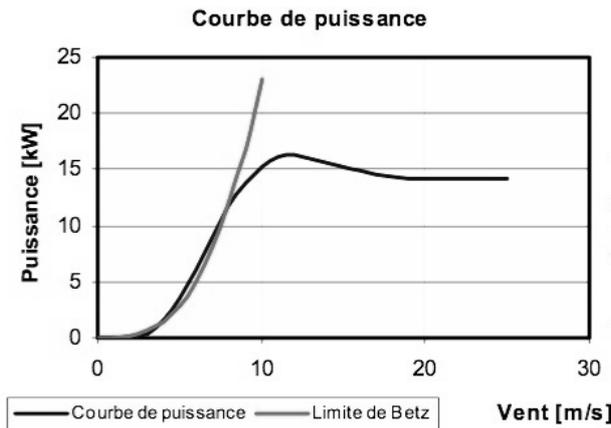


Figure 66: Courbe de puissance d'une éolienne (source: Claessens, 2010)

A la vitesse critique pour laquelle nous dimensionnons l'éolienne (3,8 m/s), nous constatons que seul le tiers de la puissance maximale peut être valorisé en électricité. La formule précédente devient finalement :

$$P_{jc-e} = \frac{\eta_{maximal}}{3} * 0,2851 * d^2 * v^3 = \frac{0,5}{3} * 0,2851 * d^2 * v^3$$

où P_{jc-e} est la puissance que l'éolienne peut réellement produire avec la vitesse de vent critique (W)

$\eta_{maximal}$ est le rendement de l'éolienne à vitesse de production optimale.

Nous savons que le taux de couverture de l'aérogénérateur est de 60%, nous devons donc dimensionner l'éolienne pour une production de :

$$P_{jc-e} = \text{Taux de couverture} * \text{Puissance journalière critique} = 0,6 * 18,8 = 11,28 \text{ kWh}$$

Le diamètre du rotor de l'éolienne doit finalement être de :

$$d = \sqrt{\frac{P_{jc-e}}{\frac{0,5}{3} * 0,2851 * v^3}} = \sqrt{\frac{11,28}{\frac{0,5}{3} * 0,2851 * (3,8)^3}} = 2,1 \text{ mètres}$$

Pour cette dimension, la puissance de crête de l'éolienne sera finalement de :

$$P_c = \eta_{maximal} * 0,2851 * d^2 * v^3 = 0,5 * 0,2851 * (2,1)^2 * (3,8)^3 = 820 \text{ W}_c$$

Nous placerons le rotor sur un mât de 10 mètres de haut afin que l'installation puisse capter un maximum de vent, sans toutefois nécessiter une demande de permis d'urbanisme.

BILAN DE L'INSTALLATION

Au final, nous constatons que la somme des productions électriques apportées par chacun des deux dispositifs permet bel et bien de subvenir aux besoins du ménage lors d'une journée où la demande est particulièrement élevée et l'efficacité faible. Il faut cependant garder à l'esprit que les sources d'énergies exploitées par ces équipements sont variables. Ainsi, même en dimensionnant par rapport à une situation critique, il se pourrait que les conditions climatiques ne permettent pas de produire suffisamment par rapport à la demande et ce sur une période plus ou moins longue. Dans ce cas, ce sont les batteries qui prendront le relais et assureront l'alimentation en électricité du foyer. Il nous faut donc les dimensionner.

5.6.3.3 LE DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES

Le nombre de jours d'autonomie durant lesquels les batteries devront pouvoir assurer l'alimentation dépend en partie du type d'installation et des conditions climatiques. On préconise généralement, pour une installation photovoltaïque ou une éolienne, une autonomie de quatre jours (Solar Technology AG, 2012). Dans notre cas, les conditions climatiques sont particulièrement propices en ce sens que la durée d'ensoleillement est élevée (2354 heures à Montélimar) et la zone exposée au vent. De plus, il s'agit ici d'une installation hybride puisque photovoltaïque et éolien se complètent. Nous prévoyons donc une durée d'autonomie de trois jours. Notons qu'il s'agit d'une autonomie théorique car, concrètement, il est peu probable que ni les panneaux photovoltaïques ni l'éolienne ne produisent d'électricité, même en très faible quantité, durant ces trois jours. Dans la pratique, l'autonomie sera donc supérieure.

Si nous avons considéré une journée dont la consommation serait critique pour le calcul des dispositifs de production, nous dimensionnerons les batteries pour subvenir aux besoins de trois journées de consommation moyenne. Nous avons montré précédemment que la demande en électricité d'une journée moyenne est de 6,82 kWh. Cette dernière doit être majorée par l'efficacité du système, à savoir le rendement de l'onduleur et des batteries. De plus, les batteries ne peuvent généralement être déchargées qu'à 50% de leur capacité totale, sous peine de réduire leur durée de vie. Il s'agit d'une valeur moyenne mais représentative de nombreux produits. Au final, la capacité totale du parc de batteries s'évalue comme suit :

$$C = \frac{D_{jm} * n}{nd * \eta_{batteries} * \eta_{onduleur}} = \frac{6,82 * 3}{0,5 * 0,9 * 0,9} = 50,5 \text{ kWh}$$

- où
- C est la capacité totale des batteries (kWh)
 - D_{jm} est la demande journalière moyenne (kWh)
 - n est le nombre de jours d'autonomie
 - nd est le niveau de décharge toléré des batteries
 - $\eta_{batteries}$ est le rendement du parc de batteries
 - $\eta_{onduleur}$ est le rendement de l'onduleur

La capacité d'une batterie est généralement donnée en Ampère-heure (Ah). Pour obtenir la capacité totale en Ampère-heure, il suffit de diviser la capacité totale exprimée en Watts-heure par la tension des batteries. Nous obtenons dès lors, pour une tension de 12 Volts, une capacité totale de :

$$C_{Ah} = \frac{C}{U} = \frac{50\,500}{12} = 4208 \text{ Ah}$$

- où
- C_{Ah} est la capacité du parc de batteries (Ah)
 - C est la capacité du parc de batteries exprimée en Watts
 - U est la tension des batteries (V)

Pour des batteries d'une capacité de 115 Ah pesant 24 kg, nous pouvons calculer le nombre de batteries nécessaires ainsi que le poids total de l'installation :

$$n = \frac{C_{Ah}}{C_b} = \frac{4208}{115} = 37 \text{ et } p = n * 24 = 37 * 24 = 888 \text{ kg}$$

Ces batteries seront placées dans le local technique de l'habitation.

5.6.3.4 DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR

Il nous reste finalement à dimensionner l'onduleur. Il s'agit d'une étape importante car sa capacité déterminera la puissance que pourra délivrer l'installation en un instant « t » afin d'alimenter les équipements de l'habitation.

Nous devons donc évaluer la puissance maximale qui pourrait être demandée au sein de l'habitation. Pour ce faire, repartons de la demande journalière critique (cf. annexe 9).

Pas de temps	Puissance (W)	Consommation (kWh)
1. Pas d'occupation	5438	5,7
2. Occupation maximale	3677	6,46
3. « Stand-by »	488	3,04

Tableau 33: Récapitulatif d'une journée critique (réalisation : Monaco, 2012)

Celle-ci se divise en trois pas de temps, selon l'occupation des habitants. Chaque pas de temps se caractérise par une consommation (en kWh), mais également par une puissance (W). C'est de cette puissance que nous devons tenir compte. La puissance de crête est de 5438 Watts. Il est généralement préconisé de surdimensionner quelque peu l'onduleur afin de prévoir un éventuel agrandissement du réseau. Nous considérerons donc une puissance de crête de 6000 Watts. Tenant compte du rendement de l'onduleur, sa capacité s'évalue finalement à :

$$C = P_c * \eta = 6000 * 0,9 = 6667 \text{ W que nous arrondirons à } 7 \text{ kW}$$

où C est la capacité de l'onduleur (W)

P_c est la puissance de crête qu'il doit pouvoir fournir (W_c)

η est le rendement de l'onduleur

5.6.3.5 REMARQUES CONCERNANT L'INSTALLATION

Une dernière notion doit être prise en compte dans l'élaboration de l'installation. Lors du choix de l'onduleur, il convient de décider de sa tension. Celle-ci peut varier entre 12 Volts, 24 Volts et 48 Volts pour la plupart des modèles. Un onduleur de 48 Volts ne peut transformer que du courant 48 Volts en courant alternatif, de même qu'un onduleur de 12 Volts ne peut transformer que du courant 12 Volts en courant alternatif. En choisissant la tension de l'onduleur, c'est donc la tension de toute l'installation que l'on fixe.

Dans notre cas, nous favoriserons un onduleur de 48 Volts qui permet de brancher les batteries 12 Volts en séries de 4 et de simplifier considérablement la gestion de ces nombreux accumulateurs. Il nous faut donc un nombre de batteries divisible par quatre. Nous arrondirons l'installation à un nombre de 40 batteries, soit 10 séries de 4 batteries. La durée d'autonomie sera donc légèrement supérieure à celle évaluée précédemment.

Les panneaux photovoltaïques produisent quant à eux une tension de 17 à 18 Volts. Nous les brancherons en séries de 3 afin que la tension en sortie du trio, égale à environ 54 Volts, puisse être ramenée à 48 Volts dans le régulateur. Pour des panneaux d'environ 1 m², l'installation compte normalement 43 panneaux. Nous arrondirons donc ce nombre à 45. Le redresseur de l'éolienne devra également être choisi afin de transformer le courant alternatif en courant continu d'une tension de 48 Volts.

5.7 SYNTHÈSE

Au sein de ce chapitre, nous avons étudié de manière détaillée les dispositifs à mettre en œuvre afin d'atteindre une autonomie totale en électricité.

Dans un premier temps, nous avons étudié de manière détaillée les équipements qui permettent de produire de l'électricité in situ. Nous avons vu qu'à l'heure actuelle seules deux technologies, le photovoltaïque et l'éolien, permettent d'atteindre concrètement cet objectif, même si les progrès dans ce domaine sont constants. A cause de la variabilité des énergies exploitées, nous avons compris qu'une production décentralisée ne pouvait faire fi d'un dispositif de stockage. Le stockage de l'électricité est un réel enjeu dans le développement des énergies renouvelables mais seules les batteries sont à ce jour accessibles au particulier. A celles-ci doivent être couplés une série de dispositifs permettant d'exploiter l'énergie, tels que le redresseur, le régulateur, le coupleur de batteries et l'onduleur.

Suite aux problématiques liées à la production et au stockage de l'électricité, il semble clair que le premier réflexe à adopter est de réduire la consommation électrique du ménage. L'éclairage et les électroménagers peuvent être extrêmement énergivores si des équipements économes ne sont pas privilégiés. De nombreux progrès ont cependant été réalisés dans ce domaine et il est désormais aisé, en les choisissant judicieusement, de faire des économies notoires. Concernant la ventilation et le refroidissement, nous avons vu que les réflexions apportées en amont du projet (conception bioclimatique, mode d'isolation,...) nous permettaient de nous passer d'équipements spécifiques, généralement très énergivores, sans nuire au confort de l'habitation. Enfin, nous avons étudié l'ensemble des dispositifs permettant la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Nous avons vu que les possibilités ne manquent en apparence pas, mais que peu d'entre elles sont véritablement réalisables dans le contexte d'une habitation autonome. Il est cependant possible, avec des moyens simples, d'assurer ces deux postes en réduisant la consommation électrique à son strict minimum.

Grâce à ces nombreuses réflexions, nous avons pu évaluer avec précision les besoins en électricité de l'habitation. Une analyse des caractéristiques du site, en terme d'ensoleillement et de vent, devrait ensuite être réalisée afin de proposer une réponse plus réaliste. Au final, nous avons pu concevoir une stratégie de production d'électricité in situ de manière à subvenir à l'ensemble des besoins du ménage et ce, même lorsque les conditions climatiques seront moins favorables. Un schéma de l'installation complète se trouve ci-dessous.

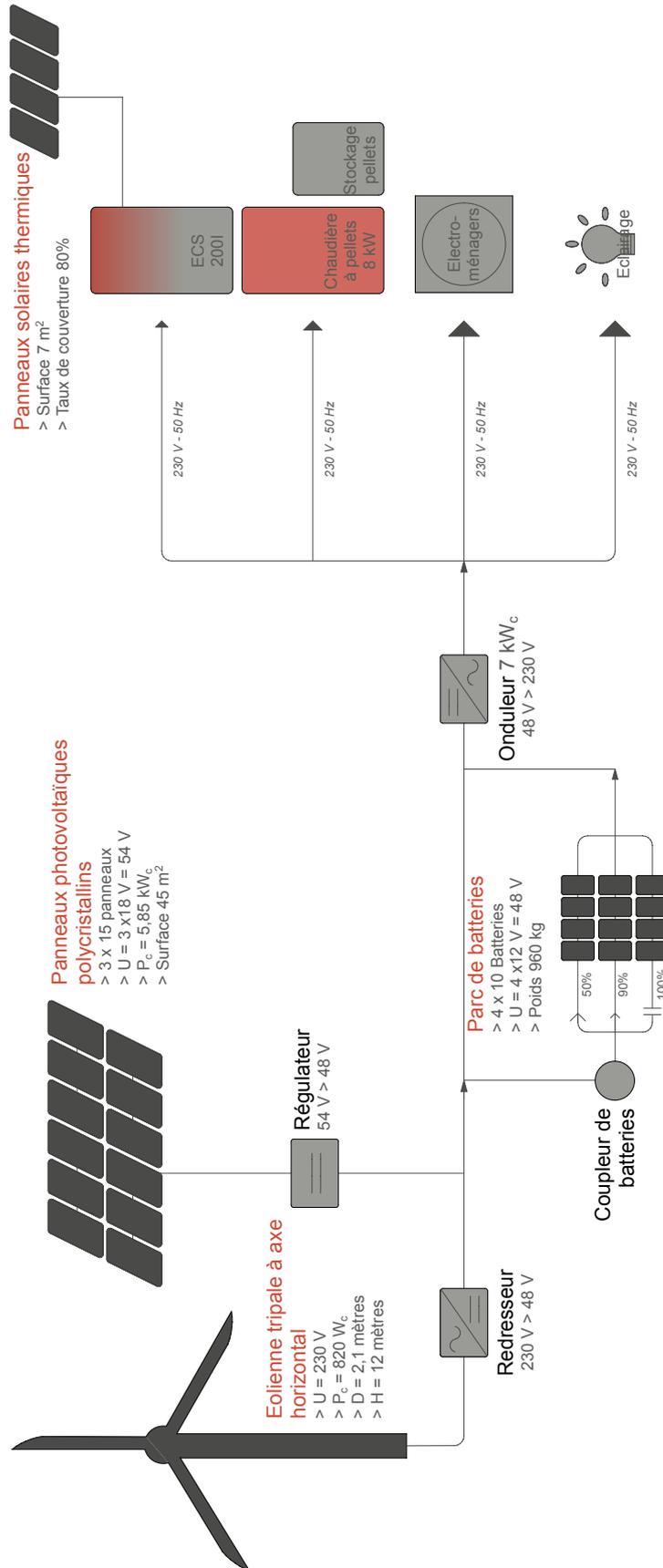


Figure 67: Schéma récapitulatif de la stratégie de production électrique in situ (réalisation: Monaco, 2012)

CHAPITRE 6

SYNTHESE

6 SYNTHÈSE

6.1 LE PROJET FINAL

Lors de la réalisation de ce travail, nous avons vu que de nombreux équipements, tant pour le traitement des eaux que pour la production d'électricité, devront être mis en place. Leur emplacement ne peut pas être choisi au hasard puisque certaines conditions doivent être réunies (orientation, inclinaison, exposition au vent,...) afin d'assurer leur bon fonctionnement. Tous ces dispositifs ne manqueront pas d'influencer le site dans lequel s'intègre l'habitation, jusqu'ici exempt de tout aménagement. Une étude de site projetée doit donc être réalisée afin de réfléchir à leur insertion dans le paysage.

6.1.1 ETUDE DE SITE PROJETEE

Les équipements doivent bien entendu être mis en place dans les limites de la propriété. Pour rappel, le domaine s'étend de la parcelle cadastrale 62 à 69 (cf. annexe 2). Les propriétaires disposent d'un vaste terrain, mais nous verrons qu'il ne s'agit pas forcément des secteurs les plus propices au déploiement des équipements.

6.1.1.1 LES DISPOSITIFS DE TRAITEMENT DES EAUX

Plusieurs dispositifs doivent être mis en œuvre pour permettre la récolte des eaux de pluie et le traitement des eaux usées. Il convient tout d'abord de définir l'emplacement de la citerne à eau de pluie, d'un volume de 30 m³. Idéalement, celle-ci doit être située hors du passage des véhicules tout en limitant autant que possible la longueur des conduites.

Concernant le traitement des eaux usées, les dispositifs sont plus nombreux. Une fosse sceptique de 7 m³ doit être prévue ainsi qu'une tranchée filtrante de 6 m² de surface (avec une profondeur de 40 centimètres) et un étang de finissage de 10 m² (avec une profondeur de 80 centimètres à 1 mètre). Nous avons convenu que le système devait exploiter la pente naturelle du terrain afin de ne pas nécessiter une pompe supplémentaire.

6.1.1.2 LES DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

Nous avons prévu deux systèmes de production d'électricité que sont les panneaux photovoltaïques, d'une surface de 45 m², et l'éolienne, d'une hauteur totale de 12 mètres. Afin de favoriser l'efficacité du système de production photovoltaïque, nous avons montré que les panneaux seraient disposés à même le sol, orientés vers le sud et avec une inclinaison de 55°.

L'implantation de l'éolienne dépend quant à elle avant tout des caractéristiques du site. En effet, nous avons vu que la régularité et la vitesse des vents peuvent être très influencées par la présence d'obstacles, tant construits que naturels. Nous devons donc favoriser une implantation offrant un dégagement maximal dans la direction des vents, à savoir la direction NNE. Le schéma suivant montre l'une des principales zones possibles d'implantation.

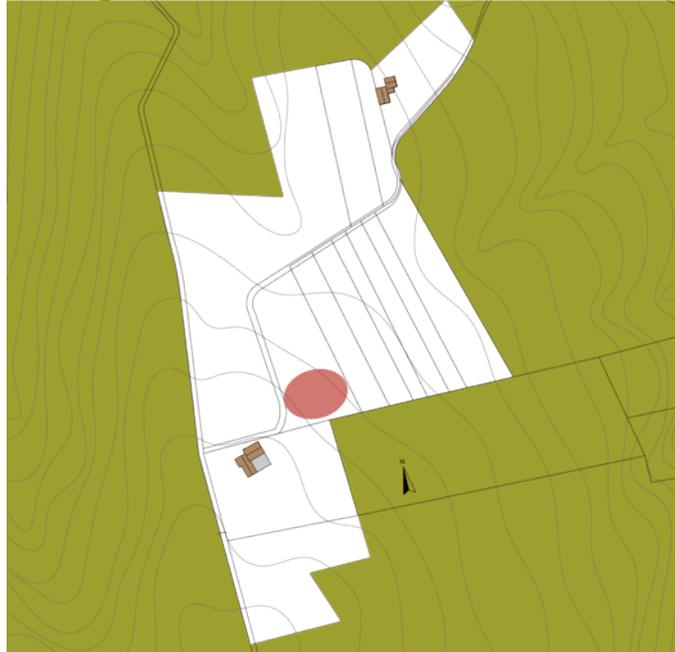


Figure 68: Zone idéale d'implantation de l'éolienne (réalisation: Monaco, 2012)

A priori, la zone hachurée en rouge semble être la zone idéale d'implantation. L'aérogénérateur y bénéficierait d'un grand dégagement dans la direction principale des vents, mais également vers l'est et l'ouest. Or, bien que supposés majoritairement de direction NNE, leur direction pourrait osciller quelque peu autour de cette position. Dans ce cas, l'aérogénérateur serait capable de profiter davantage de ces vents.

Implantée dans cette zone, l'éolienne se trouverait à proximité de l'habitation tout en étant située en contrebas, ce qui le rendrait moins visible. Depuis le chemin d'accès, elle serait en partie camouflée par la végétation se trouvant à l'arrière-plan et s'insérerait dès lors sans trop de difficultés dans le paysage. Malheureusement, cette parcelle n'appartient pas aux propriétaires. Un autre emplacement doit donc être envisagé.

6.1.2 PROPOSITION D'IMPLANTATION

Suite à cette brève analyse de site, il nous est maintenant possible de proposer une implantation des différents équipements. Une multitude d'aménagements peuvent bien sûr être envisagés, et il ne s'agit ici que d'un avant-projet, dont tous les détails techniques n'ont pas été résolus.

L'idée maîtresse guidant notre choix est de regrouper et combiner l'ensemble des interventions afin de limiter leur emprise sur le site. Les éléments susceptibles de participer à la qualité du paysage ont été mis en avant tandis que ceux susceptibles de nuire à son caractère naturel ont été dissimulés au maximum. La proposition finale se trouve à la page suivante.

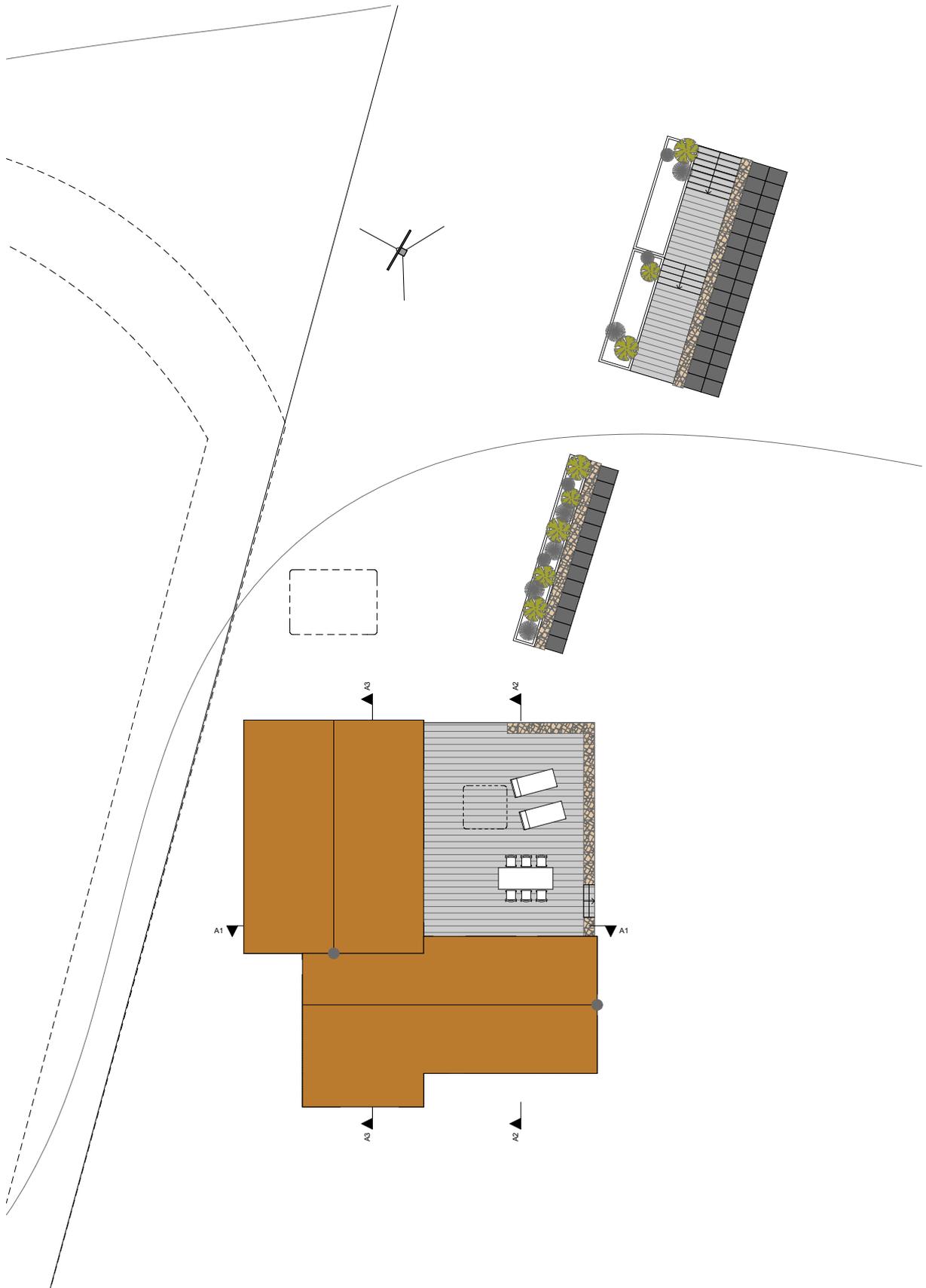


Figure 69: Proposition d'implantation (réalisation: Monaco, 2012)

Sur cette implantation, nous observons que la tranchée filtrante a été disposée parallèlement au chemin d'accès. En créant une barrière visuelle et physique, elle permet de mettre en évidence l'entrée de la maison, dissimulée depuis le chemin. L'étang de finissage, situé en contrebas, prolonge cette barrière et permet la mise en place d'un système gravitaire pour l'épuration des eaux usées.

Aux bassins sont couplées les installations photovoltaïques. Les panneaux sont ainsi orientés au sud et il est possible de leur donner l'inclinaison voulue. Chacun des deux modules s'appuie sur un mur réalisé avec les pierres récupérées de la construction (grâce au percement des baies), ce qui renforce la cohésion du site.

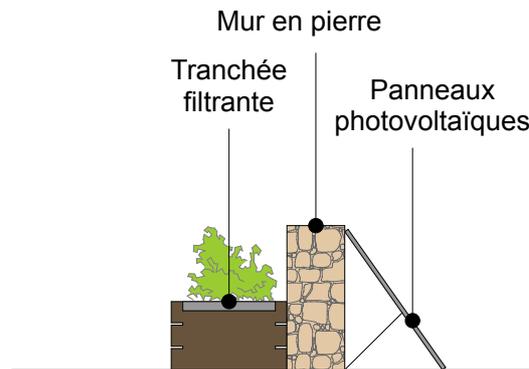


Figure 70: Aménagement combiné des dispositifs de traitement des eaux usées et de production photovoltaïque (réalisation: Monaco, 2012)

Grâce à cet aménagement, les 45 m² de panneaux photovoltaïques sont parfaitement dissimulés depuis le chemin d'accès et peu visibles depuis l'habitation. Les bassins d'épuration, par contre, sont mis en évidence et renforcent le caractère naturel du site. Le bois, rappelant la terrasse de la maison, est utilisé sur le pourtour des bassins et afin de créer une coursive le long de l'étang de finissage. L'éolienne est quant à elle implantée au plus près de son positionnement « idéal », décrit auparavant. Elle sera cependant davantage entourée d'obstacles (i.e. la maison et la végétation) et plus visible, non seulement de l'habitation mais également depuis le chemin d'accès principal.

L'implantation proposée ici reste une suggestion initiée au stade de l'avant-projet. Elle marque notre intention de porter une réflexion sur les matériaux utilisés et l'agencement des dispositifs afin de limiter leur impact visuel sur le site. Le relief devrait également être étudié de manière détaillée afin de permettre un agencement adéquat des équipements. De plus, une étude des ombrages s'avérerait fort utile afin de s'assurer que les panneaux photovoltaïques sont correctement exposés. La position finale de l'éolienne dépendra des données relevées in situ.

6.2 DISCUSSIONS

A l'issue de ce travail, il est important de porter un regard critique sur les interventions réalisées. De nombreux facteurs entrent ou sont susceptibles d'entrer en compte dans la faisabilité d'un tel projet.

6.2.1 LA FAISABILITE TECHNIQUE

Nous avons montré que, si les possibilités techniques pour rendre une habitation totalement autonome semblent ne pas manquer, très peu d'entre elles sont à ce jour véritablement accessibles et exploitables pour le particulier. Ce domaine est cependant en perpétuelle évolution, et nous pouvons espérer disposer d'un plus large panel d'alternatives dans un futur proche. Les technologies actuelles, tant en matière de traitement des eaux que de production et stockage d'électricité, offrent cependant des résultats satisfaisants. D'un point de vue purement technique, l'autonomie totale d'une habitation est donc tout à fait réalisable. Les véritables limites de ce type de projets se situent ailleurs, dans des domaines tels que le contexte climatique, législatif ou encore l'investissement économique.

6.2.2 LA RENTABILITE ECONOMIQUE

Le paramètre économique est évidemment fondamental. Si le choix de certaines personnes est avant tout guidé par l'aspect écologique, celui-ci relève également souvent d'une question de rentabilité financière. Le raccordement d'une maison en site isolé peut en effet s'avérer très onéreux. En France, on estime à 15 000 € par kilomètre le raccordement électrique aérien, et à 45 000 € par kilomètre le raccordement par ligne enterrée (Blugeon, 2011). Selon l'éloignement de l'habitation, une installation autonome peut ainsi s'avérer plus intéressante.

Evaluons sommairement la rentabilité de l'installation. La maison étudiée n'est pas extrêmement éloignée des réseaux publics d'alimentation. Elle se situe tout au plus à un kilomètre de la maison des Rey, située au pied de la colline. En cas de raccordement électrique, il s'agirait probablement d'une ligne aérienne, c'est pourquoi nous considérerons un coût de 15 000 €. Le prix d'une éolienne varie de 2500 à 5000 € par kiloWatt installé. L'éolienne installée présentant une puissance de crête de 820 W_c, nous considérerons un coût, probablement légèrement surestimé, de 5000 €. Le prix d'une installation photovoltaïque est quant à lui évalué à environ 4500 € par kiloWatt-crête. Dans notre cas, celle-ci s'élève à 5,5 kW_c et l'installation coûterait donc environ 25 000 €. Au total, quelques 30 000 € devraient être théoriquement consacrés à la mise en œuvre des installations éolienne et photovoltaïque, soit environ le double du prix du raccordement. Deux paramètres supplémentaires entrent cependant en jeu.

Tout d'abord, une juste évaluation du coût devrait tenir compte des nombreuses primes en vigueur, destinées à valoriser les énergies renouvelables. Il existe même des associations, comme le Fond d'Amortissement des Charges d'Electrification (FACE), qui financent la production décentralisée d'électricité par des énergies renouvelables comme alternative à une extension du réseau de distribution (Blugeon, 2011). Ensuite, une production électrique in situ est avant tout un investissement sur le long terme puisqu'aucune facture d'électricité ne devra ensuite être payée.

L'évaluation économique d'une installation est donc relativement complexe mais, dans le cas de personnes dont l'unique objectif est la rentabilité, c'est le paramètre qui déterminera véritablement la réalisation ou non du projet.

6.2.3 L'INTERET ECOLOGIQUE

Pour beaucoup, le véritable intérêt de l'autonomie résulte avant tout d'un souci d'écologie. Ces personnes désirent s'assurer que l'eau qu'ils consomment et rejettent, ou que l'électricité qu'ils produisent, ne nuit pas à l'environnement.

Nous avons expliqué que vivre de manière autonome requiert une attention permanente de la part des propriétaires par rapport à leur comportement. Ils doivent contrôler et entretenir les installations tout en surveillant leurs consommations en eau et en électricité. Une habitation autonome engendre de nombreuses contraintes, demande une grande adaptabilité et beaucoup de temps. Même en mettant tout en œuvre pour assurer le confort des habitants, comme nous avons cherché à le faire, il s'agit indéniablement d'un mode de vie très particulier, réservé à une minorité. Dans ce cas, outre l'aspect financier, c'est avant tout un désir d'écologie qui prime.

Malheureusement, les technologies disponibles à ce jour ne satisfont pas totalement à ce désir. L'utilisation de groupes électrogènes, exploitant des combustibles fossiles, ou de batteries, exploitant des électrolytes non recyclables, est fréquente dans les maisons autonomes. Ces éléments permettent de pallier à la variabilité des énergies éolienne et solaire.

En outre, nous pouvons nous questionner sur l'écobilan des dispositifs mis en place. Les industries de production photovoltaïque feraient appel à des gaz rares et produits chimiques, fonctionnant certes en circuit fermé, mais potentiellement dangereux. Elles sont certifiées ISO9001, norme définissant les exigences concernant l'organisation d'un système et la gestion de la qualité¹¹, mais ce n'est pas toujours gage de qualité. Nous assistons néanmoins à de nombreux progrès en matière d'énergie grise. D'après une étude de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) réalisée en 2006 sur 26 pays d'ensoleillement différent, un système photovoltaïque couplé au réseau rembourserait son énergie grise en 1,6 à 3,3 ans (Blugeon, 2011). Espérons que ces paramètres soient davantage pris en compte dans les années futures.

6.2.4 LES PARAMETRES CLIMATIQUES

La faisabilité d'un projet autonome est indissociable des conditions climatiques dans lesquelles il s'insère. Il va de soi qu'une région pluvieuse favorisera l'autonomie en eau, et qu'une région venteuse ou ensoleillée favorisera la production éolienne ou solaire. Des conditions défavorables ne nuiront pas véritablement à la réalisation du projet, mais entraîneront un surcoût dû à la complexification des stratégies à mettre en œuvre (réutilisation des eaux usées, nécessité d'un groupe électrogène,...). Tout au long de ce projet, nous avons constaté que les conditions climatiques de cette région de la France semblent particulièrement propices. Les pluies sont abondantes et relativement bien réparties sur l'année, l'ensoleillement est élevé et tout porte à croire que le vent le sera également.

Au vu d'une telle dépendance, nous pouvons nous interroger sur l'évolution du climat dans la région. Sera-t-il davantage favorable d'ici quelques années, nous confortant dans les choix effectués, ou au contraire risque-t-il de mettre à mal les solutions retenues ? L'analyse des évolutions récentes dans la région Rhône-Alpes (Auffray et al., 2010), permet un début de réponse. Depuis 1953, une hausse des températures de l'ordre de 0,3 degrés par décennie a été constatée. Cette augmentation s'inscrit dans l'évolution mondiale des températures au cours des cinquante dernières années, même si cette dernière ne s'élève qu'à 0,13 degrés par décennie. L'évolution des précipitations est quant à elle difficilement prévisible mais,

¹¹ Source : wikipedia.org

selon certains modèles mathématiques, tendrait à diminuer, jusqu'à 300 millimètres en 2080. Ce serait principalement en hiver que la baisse des précipitations se ferait ressentir. Le sud de la région serait également enclin à un allongement des périodes sèches et on assisterait à une multiplication de pluies intenses. Aucune tendance n'est encore dégagée par rapport à l'évolution des vents.

Dans ce cas de figure, c'est principalement la stratégie de l'eau qui risquerait d'être mise à mal. Avec des précipitations moins fréquentes mais plus intenses, il faudrait une citerne à eau de pluie encore bien plus grande. Dès lors, le dispositif mis en œuvre devrait éventuellement être revu au profit d'autres techniques (puits, réutilisation des eaux usées,...).

6.2.5 LES DIFFICULTES LEGISLATIVES

Certes, le climat influence les solutions retenues, mais le principal frein au développement de ce type d'habitation réside aujourd'hui dans la législation. Souvent méfiantes, les autorités n'encouragent pas beaucoup ce type de démarche. Ce n'est pourtant qu'avec leur soutien qu'il sera possible d'obtenir les dérogations nécessaires afin de valoriser le patrimoine bâti qui fait toute la richesse de la France.

6.2.6 SYNTHÈSE

Outre l'aspect purement technique, de nombreux paramètres influencent donc la faisabilité des projets autonomes. A l'heure actuelle, ces habitations sont encore réservées à une minorité de personnes motivées et déterminées. Vivre de manière autonome, c'est vivre au gré des aléas de la nature, qui sera peut-être résolument moins clémente demain. Elles représentent également un investissement important, à moins de sacrifier une grande partie de son confort. L'objectif n'est pourtant pas d'effectuer un retour en arrière, et de nombreuses évolutions technologiques, mais également de mentalité, devront être réalisées pour que les habitations autonomes deviennent la réalité de demain.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

7 CONCLUSION

7.1 CONCLUSIONS GENERALES

A travers ce projet, nous avons cherché à déterminer si une habitation en site isolé pouvait être totalement autonome des réseaux publics. Pour ce faire, nous avons organisé le travail autour des deux problématiques principales engendrées par cette situation, à savoir l'eau et l'électricité. Pour chacune d'elles, nous avons adopté une démarche similaire en évaluant tout d'abord les difficultés engendrées par l'indépendance vis-à-vis des réseaux publics. Il est apparu que l'alimentation continue de l'habitation à partir de sources variables (précipitations, soleil et vent) constituait l'enjeu majeur.

Nous nous sommes dès lors aperçus que, pour espérer être autonomes, il était indispensable de cibler et de diminuer préalablement les besoins. Cet objectif nous a conduits à nous intéresser à toute une série de problématiques connexes. Nous avons ainsi abordé les travaux de réhabilitation de la maison, ce qui nous a permis de jeter les bases du travail et de définir les principales caractéristiques du projet, principalement en matière de performances thermiques.

Nous avons ensuite défini l'ensemble des équipements qui devront être mis en œuvre dans l'habitation, notamment en termes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Ce n'est qu'une fois toutes ces étapes réalisées que nous avons pu concrètement envisager la manière de répondre aux besoins. Pour chaque thème, plusieurs solutions ont été envisagées, dans le respect des objectifs que nous nous étions fixés. Le choix des technologies mises en œuvre a finalement été motivé à partir des caractéristiques propres au projet, et nous avons pu proposer une solution concrète permettant de subvenir aux besoins.

A la question « les progrès technologiques actuels permettent-ils de valoriser le patrimoine bâti existant en site isolé ? », il est désormais possible d'apporter une réponse. Ce travail montre que c'est effectivement possible, mais que ce doit être nuancé. Nous avons constaté que de nombreuses technologies ne sont pas encore suffisamment développées pour pouvoir être exploitées. Dès lors, il convient de composer avec les quelques systèmes disponibles à ce jour. Ceux-ci présentent encore de nombreuses contraintes (entretien, variabilité des énergies, pollution, durée de vie,...) et des sacrifices en matière de confort sont inévitables. Nous avons également mis en évidence le fait que la faisabilité de ce type de projets est entièrement dépendante des conditions climatiques du site, même si le paramètre économique influence sans nul doute les solutions retenues.

Ce travail a donc permis de mettre en lumière tout le potentiel des nouvelles technologies dans un domaine, la valorisation du patrimoine rural, dont l'utilité n'avait jusqu'alors que peu été envisagée. Cependant, outre leurs capacités, ce sont également leurs limites qui ont été pointées. C'est donc dans l'espoir que des progrès notoires seront prochainement réalisés que nous clôturerons ce mémoire.

7.2 PERSPECTIVES

Comme répété tout au long de ce travail, les progrès technologiques susceptibles de faire des maisons autonomes la réalité de demain sont incessants. Dès lors, de nombreux domaines pourraient être explorés afin d'évaluer le potentiel de ces habitations.

La réduction de la consommation est actuellement inhérente aux projets de ce type. Il serait intéressant d'évaluer dans quelle mesure une habitation pourrait être rendue autonome sans se priver. Jusqu'à quel point le dispositif s'avèrerait-il rentable ? Dans quelle mesure les équipements devraient-ils être surdimensionnés ? Selon un autre point de vue, quelles techniques futures permettraient de pallier aux défauts des dispositifs actuels afin que l'autonomie puisse devenir une généralité ?

Les conditions climatiques influencent fortement la faisabilité de tels projets. Nous avons montré qu'a priori, le site étudié était particulièrement favorable à l'autonomie, tant en matière de précipitations, de vents que d'ensoleillement. Dès lors, il serait intéressant de reproduire cette démarche sous des climats totalement différents et nettement plus défavorables. Qu'en serait-il d'une habitation similaire en Norvège ou dans le désert du Sahara ? Quelles technologies pourraient être exploitées et quelles stratégies pourraient être mises au point ? L'autonomie ne présente en effet que très peu d'intérêt si elle doit se limiter à quelques cas privilégiés.

Finalement, nous avons parlé jusqu'à présent d'autonomie vis-à-vis des réseaux publics d'alimentation. Il serait intéressant d'évaluer dans quelle mesure une habitation pourrait totalement se suffire à elle-même, tant en matière d'eau et d'électricité que de chauffage. Cela demanderait probablement la mise en œuvre de techniques bien plus complexes, mais c'est peut-être là que se trouve tout le potentiel des maisons autonomes.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES ET ARTICLES SCIENTIFIQUES

Abdulla F.A., Al-Shareef A.W., *Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan*, Desalination 243, p. 195-207, Elsevier, Mai 2008.

Amet P., Gourdon G., Guern Y., Jules R., Marguet E., Mykieta F., *Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire*, Eyrolles, France, Octobre 2010.

Aubert C., *Poêles, inserts et autres chauffages au bois – les nouveaux matériels, performants et économes*, Terre Vivante, France, 1999.

Auffray A., Brisson A., Tamburini A., Dziak A., Maloisel V., Martinoni-Lapierre S., *Climat de la région Rhône-Alpes*, Météo-France, 2010.

Barneron C., *Plan Local d'Urbanisme (PLU) – rapport de présentation – Commune de Grâne*, France, Novembre 2007.

Blugeon J.-P., *Produire son électricité avec les énergies solaires et éoliennes : principe, exemples de réalisation*, Ulmer, France, Juillet 2011.

Boudellal M., *Ecologique et autonome – concevoir autrement son habitat*, Dunod, France, Août 2011.

Cabrit-Leclerc S., *Fosse sceptique, roseaux, bambous ? Traiter écologiquement ses eaux usées*, Terre vivante, France, Juin 2010.

Cheng C.-L., *Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building*, Energy and buildings 34, p. 261-266, Elsevier, Juillet 2001.

Claessens B., Huart M., Grulois C., Platbrood F., Verlaet E., Delville B., Brunin G., Van Belle J.-F., Chaoui S., *Vade-mecum pour l'implantation d'éoliennes de faible puissance en Région wallonne*, Etude réalisée pour le compte de la Région wallonne, Belgique, Décembre 2010.

Conseil Général de la Drôme, *Schéma général d'assainissement – dossier d'enquête publique – commune de Grâne (26)*, Version 1, France, Novembre 2006.

De Herde D., Trachte S., *Advanced and Sustainable Housing Renovation : A guide for designers and planners*, Internation Energy Agency (IEA), Juin 2010.

De Herde D., Liébard A., *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique : édifier et aménager avec le développement durable*, Observ'ER : observatoire des énergies renouvelables, Décembre 2005.

Deltau G., *Récupérer et valoriser l'eau de pluie dans la maison*, Editions S.A.E.P., France, 2004.

de Meester T., *Rénovation basse énergie des logements : Guide de la rénovation basse énergie en Belgique*, Mai 2009.

- Denninger M.**, *Chauffage et petite cogénération*, Eyrolles, France, Février 2012.
- Filloux A.**, *Intégrer les énergies renouvelables – Choisir, intégrer et exploiter les systèmes utilisant les énergies renouvelables*, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), France, Juillet 2010.
- Gallauziaux T., Fedullo D.**, *Le grand livre de l'isolation*, Eyrolles, France, Mars 2009.
- Gérard M., Barthélémy J-P., Copin A.**, *Potabilisation des eaux par ozonation et par adsorption sur charbons actifs*, Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux, Mai 2011.
- Gray N.F.**, *Water technology : an introduction for environmental scientists and engineers*, Third edition, Elsevier, Dublin, 2010.
- Guedj M.**, *Chauffage 100% durable – Le diagnostic, les solutions, les étapes pour réussir*, Hachette, France, Mars 2010.
- Hedegaard K., Meibom P.**, *Wind power impacts and electricity storage – A time scale perspective*, Renewable Energy 37, p. 318-324, Elsevier, Juin 2011.
- Hegger M., Fuchs M., Stark T., Zeumer M.**, *Construction et énergie : Architecture et développement durable*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2011.
- Kaldellis J. K., Zafirakis D.**, *Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency*, Energy 32, p. 2295-2305, Elsevier, Mai 2007.
- Le Goarnig P.**, *L'isolation bio de la maison ancienne*, Eyrolles, France, Novembre 2008.
- Li F., Wichmann K., Otterpohl R.**, *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses*, Science of the Total Environment 407, p. 3439-3449, Elsevier, Novembre 2008.
- Orszàgh J.**, *La gestion durable de l'eau dans le monde*, www.eautarcie.org, Mai 2012.
- Percebois J.-M.**, *Le guide du chauffage géothermique*, Eyrolles, France, avril 2011.
- Rahman F., Rehman S., Abdul-Majeed M. A.**, *Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, p. 274-283, Elsevier, Juillet 2011.
- Reissmann F.G., Uhl W.**, *Ultrafiltration for the reuse of spent filter backwash water from drinking water treatment*, Desalination 198, p. 225-235, Elsevier, Mars 2006.
- Reiter S.**, *Conception environnementale des constructions dans le cadre du développement durable – Chapitre 4 : Principes et techniques de la conception environnementale – La gestion de l'eau*, Université de Liège, 2010.
- Riolet E.**, *L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier*, Eyrolles, France, Décembre 2010.
- Riolet E.**, *Le mini-éolien*, Eyrolles, France, Mars 2010.
- Ruot B.**, *Les enduits de façade : Mise en œuvre des enduits minéraux sur supports neufs et anciens*, Collection Guide Pratique, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Décembre 2009.

Rygaard M., Binning P.J., Albrechtsen H.J., *Increasing urban water self-sufficiency : New year, new challenges*, Journal of the Environmental Management 92, p. 185-194, Elsevier, Novembre 2009.

Salomon T., Aubert C., *Fraîcheur sans clim' – le guide des alternatives écologiques*, Terre vivante, France, Juillet 2004.

Schwartzenberger L., *Maison passive – géothermie et pompe à chaleur*, S.A.E.P., France, Avril 2008.

Service Public d'Assainissement Non Collectif (SPANC), *Manuel pour la réalisation et l'entretien de votre installation d'assainissement autonome*, France, Janvier 2006.

Sidler O., *Consommation de veille des principaux appareils domestiques – Notes techniques et réflexions*, Enertech, France, Février 2012.

Solar Technology AG (SMA), *Approvisionnement en énergie solaire des sites isolées et systèmes de secours*, Juillet 2012.

Vanderstadt H., *Het autonome huis en eco-housing : een handleiding naar meer zekerheid*, www.hetautonomehuis.be, Ecobooks, Novembre 2011.

Voss K., Goetzberger A., Bopp G., Häberle A., Heinzel A., Lehmborg H., *The self-sufficient solar house in Freiburg – Results of 3 years of operation*, Pergamon Press, 1996.

Vu B., *Récupérer les eaux de pluie*, Editions Eyrolles, France, Juin 2006.

Wandji Mbatchou C., *Potabilisation au niveau domestique d'eaux de pluie de qualité hygiénique médiocre en pays en voie de développement*, Mémoire, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 2004.

White A., Parks G., Markides C. N., *Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage*, Applied Thermal Engineering, p. 1-8, Elsevier, Mars 2012.

REGLEMENTATION

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements*, Journal Officiel de la République française, Mars 1982.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants*, Journal Officiel de la République française, 17 mai 2007.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/l de DBO5*, Journal Officiel de la République française, Septembre 2009.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Réglementation thermique 2012 (RT2012) – Méthode de calcul Th-BCE 2012*, 2012.

SITES INTERNET

www.google.com, Février 2012.

www.geoportail.gouv.fr, Mars 2012.

www.meteofrance.com, Mars 2012.

www.ademe.fr, *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*, Mars 2012.

www.legrenelle-environnement.fr, Avril 2012.

www.larousse.fr, Mai 2012.

www.legifrance.gouv.fr, Mai 2012.

www.habitat-ecologique.org, Juin 2012.

www.guidetopten.fr, Juillet 2012.

www.meteo.be, Juillet 2012.

www.enertech.fr, Juillet 2012.

www.curbain.be, Juillet 2012.

www.energieplus-lesite.be, *Aide à la décision en efficacité énergétique des bâtiments du secteur tertiaire, Cellule de recherche Architecture et Climat – Université Catholique de Louvain*, Juillet 2012.

www.ef4.be, *Energie Facteur 4*, Août 2012.

www.fr.windfinder.com, Août 2012.

ENTRETIENS

Famille Lavianne, propriétaires de la maison, juin 2011.

M. Grimaud, adjoint au Maire de Grâne, Juillet 2011.

LOGICIELS

Pleiades+Comfie, *Programme de simulation thermique dynamique multizone*, www.izuba.fr, Izuba Energies, avril 2012.

CalSol, www.ines.solaire.free.fr, Institut National de l'énergie Solaire (INES), août 2012.

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1: THE SELF-SUFFICIENT SOLAR HOUSE, FREIBURG (ALLEMAGNE) (SOURCE: GOOGLE.COM, 2012).....	2
FIGURE 2: MAISON AUTONOME ET SANS FACTURE (FRANCE) (SOURCE: NATURE-CONSTRUCTION.COM, 2012) .	3
FIGURE 3: STRUCTURE GENERALE DU TRAVAIL (REALISATION: MONACO, 2012).....	4
FIGURE 4: DEPARTEMENT DE LA DROME, REGION RHONE-ALPES (REALISATION : MONACO ; SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	6
FIGURE 5: COMMUNE DE GRANE, DEPARTEMENT DE LA DROME (REALISATION : MONACO ; SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	7
FIGURE 6: BOIS DE NOCHE, COMMUNE DE GRANE (SOURCE : BARNERON, 2007)	7
FIGURE 7: CARTE MINUTE D'ETAT MAJOR, 1827 (SOURCE : GEOPORTAIL.GOUV.FR, 2012).....	8
FIGURE 8: PLAN CADASTRAL DU BOIS DE NOCHE (SOURCE: GEOPORTAIL.GOUV.FR, 2012).....	9
FIGURE 9: SCHEMA RECAPITULATIF DU CONTEXTE NATUREL ET BATI ET DE L'ACCESSIBILITE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : GEOPORTAIL.GOUV.FR, 2012).....	10
FIGURE 10: OBJECTIFS POUR L'AUTONOMIE (REALISATION : MONACO, 2012).....	15
FIGURE 11: STRATEGIE D'HIVER (REALISATION : MONACO, 2012).....	21
FIGURE 12: STORES VENITIENS EXTERIEURS (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012).....	21
FIGURE 13: STRATEGIE D'ETE (REALISATION : MONACO, 2012)	22
FIGURE 14: PRINCIPE DU DRAINAGE PERIPHERIQUE (SOURCE : LE GOARNIG, 2008)	27
FIGURE 15: PRINCIPE DU HERISSON VENTILE (SOURCE : LE GOARNIG, 2008).....	28
FIGURE 16 : TOITURE A RESTAURER ET TOITURE CONSERVEE (REALISATION : MONACO, 2012).....	29
FIGURE 17: PONT THERMIQUE ENGENDRE A LA JONCTION MUR-TOITURE (REALISATION: MONACO, 2012).....	30
FIGURE 18: ISOLATION D'UNE TOITURE PAR CAISSONS EXTERIEURS REMPLIS D'ISOLANT (SOURCE : LE GOARNIG, 2008)	30
FIGURE 19: JONCTION MUR-TOITURE (REALISATION : MONACO, 2012).....	32
FIGURE 20: JONCTION MUR-SOL (REALISATION : MONACO, 2012).....	33
FIGURE 21: JONCTION PIGNON-TOITURE (REALISATION : MONACO, 2012).....	33
FIGURE 22: RECAPITULATIF DU NIVEAU D'ISOLATION DE L'ENVELOPPE (REALISATION : MONACO, 2012)	38
FIGURE 23: OBJECTIFS POUR L'AUTONOMIE EN EAU (REALISATION : MONACO, 2012)	40
FIGURE 24: FILTRE A FEUILLES (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012).....	45
FIGURE 25: FOSSE A SEDIMENTS (SOURCE: VU, 2006)	45
FIGURE 26: FILTRE AUTONETTOYANT (SOURCE : VU, 2006)	45
FIGURE 27: FILTRE A PLANTES (REALISATION : MONACO, 2012).....	46
FIGURE 28: CITERNE EN MAÇONNERIE (SOURCE : DELTAU, 2004)	48
FIGURE 29: PHOTOGRAPHIE D'UNE TLB CHEZ UN PARTICULIER (SOURCE : HABITAT-ECOLOGIQUE.ORG, 2012)	54
FIGURE 30: REPARTITION PAR DEPARTEMENT DU NOMBRE DE FOYERS UTILISANT DES TOILETTES SECHES EN 2010 (SOURCE : HABITAT-ECOLOGIQUE.ORG, 2012)	55
FIGURE 31: SPECTRE ULTRAVIOLET (REALISATION : MONACO ; SOURCE : WANDJI MBATCHOU, 2004).....	57
FIGURE 32: ROBINET POUSSOIR - ARRIVEE D'EAU POTABLE (SOURCE : ORSZAGH, 2012)	58
FIGURE 33: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN OSMOSEUR (REALISATION : MONACO ; SOURCE : GRAY, 2011)	60
FIGURE 34: RECAPITULATIF DE LA POROSITE DES FILTRES ET TAILLE DES POLLUANTS DE L'EAU (REALISATION : MONACO ; SOURCE : GRAY, 2011)	61
FIGURE 35: SCHEMA RECAPITULATIF DU SYSTEME DE TRAITEMENT DES EAUX DOMESTIQUES (REALISATION : MONACO, 2012).....	63
FIGURE 36: FILTRE PLANTE DE ROSEAUX VERTICAL (SOURCE : CABRIT-LECLERC, 2010)	69
FIGURE 37: FILTRE PLANTE DE ROSEAUX HORIZONTAL (SOURCE : CABRIT-LECLERC, 2010).....	69
FIGURE 38: DIGESTEURS COMPLANTES - COUPE SCHEMATIQUE (SOURCE : CABRIT-LECLERC, 2010)	70
FIGURE 39: LAGUNAGE - PRINCIPE EPURATOIRE (SOURCE : CABRIT-LECLERC, 2010).....	70
FIGURE 40: SYSTEME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USEES (REALISATION : MONACO, 2012).....	72
FIGURE 41: SYSTEME A DOUBLE CIRCUIT DE DISTRIBUTION (REALISATION : MONACO ; SOURCE : VANDERSTADT, 2011)	79
FIGURE 42: SYSTEME A SIMPLE CIRCUIT DE DISTRIBUTION (REALISATION : MONACO ; SOURCE : VANDERSTADT, 2011)	80
FIGURE 43: SOLUTIONS ALTERNATIVES - REUTILISATION DES EAUX USEES (REALISATION : MONACO, 2012) .	81
FIGURE 44: SOLUTIONS ALTERNATIVES - AUGMENTATION DE LA SURFACE DE COLLECTE (REALISATION : MONACO, 2012).....	83

FIGURE 45: SCHEMA RECAPITULATIF DE LA RECOLTE, DU TRAITEMENT ET DE L'EPURATION DES EAUX (REALISATION : MONACO, 2012).....	85
FIGURE 46: PRINCIPE DU PHOTOVOLTAÏQUE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : HEGGER ET AL., 2011).....	88
FIGURE 47: MINI-EOLIENNE TRIPALE A AXE HORIZONTAL (SOURCE : RIOLET, 2010)	92
FIGURE 48: MINI-EOLIENNES A AXE VERTICAL DE TYPE SAVONIUS ET DARRIEUS (SOURCE : RIOLET, 2010)...	92
FIGURE 49: PRINCIPE DU GROUPE ELECTROGENE (REALISATION : MONACO, 2012)	94
FIGURE 50: INSTALLATION DE PRODUCTION ELECTRIQUE EOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE (REALISATION : MONACO, 2012).....	99
FIGURE 51: LAMPE FLUOCOMPACTE (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	100
FIGURE 52: LAMPE A DIODE ELECTROLUMINESCENTE (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	100
FIGURE 53: ORGANIC LED (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	101
FIGURE 54: NOUVELLE ETIQUETTE-ENERGIE (SOURCE : GOOGLE.COM, 2012)	102
FIGURE 55: CUISINIERE A BOIS (SOURCE : BOUDELLAL, 2010)	104
FIGURE 56: FOYER DE COMBUSTION AVEC AMENEE D'AIR PRIMAIRE ET SECONDAIRE (SOURCE: AUBERT, 1999)	113
FIGURE 57: PERTES AU SEIN D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN (REALISATION: MONACO ; SOURCE : AMET ET AL., 2010).....	115
FIGURE 58: BOUCLE DE TICKELMAN (REALISATION: MONACO; SOURCE: AMET ET AL., 2010).....	116
FIGURE 59: PRINCIPE DE LA POMPE A CHALEUR (REALISATION: MONACO; SOURCE: HEGGER ET AL., 2011).118	
FIGURE 60: PRINCIPE DE LA VANNE TROIS VOIES (SOURCE: ENERGIEPLUS-LESITE.BE, 2012).....	120
FIGURE 61: SCHEMA RECAPITULATIF DES DISPOSITIFS DE CHAUFFAGE ET DE PRODUCTION D'ECS (REALISATION: MONACO ; SOURCES: ENERGIE-PLUS-LESITE.BE, 2012 & AMET, 2010).....	125
FIGURE 62: CARTE DU GISEMENT SOLAIRE EN FRANCE EN kWh/m ² (SOURCE : BLUGEON, 2008).....	127
FIGURE 63: CARTE DU GISEMENT EOLIEN EN FRANCE A UNE ALTITUDE DE 50 METRES (SOURCE: BLUGEON, 2008)	129
FIGURE 64: ROSE DES VENTS DE LA VILLE DE MONTELMAR (SOURCE : WINDFINDER.COM, 2012)	130
FIGURE 65: COEFFICIENT DE RECUPERATION LIMITE SELON LE MODELE DE L'EOLIENNE (SOURCE: CLAESSENS, 2010)	134
FIGURE 66: COURBE DE PUISSANCE D'UNE EOLIENNE (SOURCE: CLAESSENS, 2010)	135
FIGURE 67: SCHEMA RECAPITULATIF DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION ELECTRIQUE IN SITU (REALISATION: MONACO, 2012).....	139
FIGURE 68: ZONE IDEALE D'IMPLANTATION DE L'EOLIENNE (REALISATION: MONACO, 2012)	142
FIGURE 69: PROPOSITION D'IMPLANTATION (REALISATION: MONACO, 2012).....	143
FIGURE 70: AMENAGEMENT COMBINE DES DISPOSITIFS DE TRAITEMENT DES EAUX USEES ET DE PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE (REALISATION: MONACO, 2012)	144

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: RECAPITULATIF DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTS MODES D'ISOLATION (REALISATION : MONACO ; SOURCE : DE MEESTER, 2009).....	25
TABLEAU 2: COMPARAISON DES PERFORMANCES DES SIMPLE, DOUBLE ET TRIPLE VITRAGES (REALISATION : MONACO ; SOURCE : LE GOARNIG, 2008)	31
TABLEAU 3: RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES ET POLLUANTS DE L'EAU DE PLUIE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : ORSZAGH, 2012)	42
TABLEAU 4: TAUX DE PERTES EN EAU DE PLUIE EN FONCTION DE LA NATURE DE LA TOITURE ET EFFETS INDESIRABLES (SOURCE : DE MEESTER, 2009)	44
TABLEAU 5: COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES DE L'EAU DE PLUIE ET DE L'EAU D'UNE CITERNE EN BETON (SOURCE : ORSZAGH, 2012)	48
FIGURE 6: SYSTEME DE RECOLTE DES EAUX DE PLUIE (REALISATION : MONACO, 2012)	50
TABLEAU 7: COMPARAISON QUANTITATIVE DES QUALITES DE L'EAU POTABLE EN BELGIQUE, OMS ET POUR L'UNION EUROPEENNE (REALISATION : MONACO, SOURCES : ORSZAGH, 2012 ET LENNTECH.COM, 2012)	51
TABLEAU 8: CONSOMMATION MOYENNE JOURNALIERE EN EAU PAR HABITANT (REALISATION : MONACO ; SOURCE : DELTAU, 2004)	52
TABLEAU 9: QUANTIFICATION DES PERTES EN EAU DUES AUX FUITES (SOURCE : DE HERDE & TRACHTE, 2010)	52
TABLEAU 10: RECAPITULATIF DES SYSTEMES ECONOMES EN EAU (SOURCE : DE HERDE & TRACHTE, 2010).....	53
TABLEAU 11: CONSTITUANTS NECESSAIRES A LA PRODUCTION D'HUMUS (SOURCE : ORSZAGH, 2012).....	55
TABLEAU 12: COMPARATIF DES CONSOMMATIONS D'UN MENAGE MOYEN ET ECONOME EN FRANCE ET DU MENAGE ETUDIE (REALISATION : MONACO, 2012)	56
TABLEAU 13: COMPARAISON ENTRE ULTRAFILTRATION ET OSMOSE INVERSE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : ORSZAGH, 2012)	61
TABLEAU 14: COMPARAISON ENTRE LES POLLUANTS DES EAUX GRISES ET DES EAUX NOIRES (REALISATION : MONACO ; SOURCES : CABRIT LECLERC, 2010 & ORSZAGH, 2012).....	66
TABLEAU 15: RECAPITULATIF DES DISPOSITIFS D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USEES (REALISATION : MONACO ; SOURCES : CABRIT-LECLERC, 2010 ; ORSZAGH, 2012 ; REITER, 2010)	67
TABLEAU 16: EAU DE PLUIE RECOLTEE CHAQUE MOIS PAR LA TOITURE DE L'HABITATION (REALISATION : MONACO, 2012).....	75
TABLEAU 17: REPARTITION DES PRECIPITATIONS DANS LA CITERNE POUR SUBVENIR AUX BESOINS DU MENAGE (REALISATION : MONACO, 2012).....	76
TABLEAU 18: CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES DIFFERENTS TYPES DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES (REALISATION : MONACO ; SOURCE : RIOLET, 2010).....	89
TABLEAU 19: COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE LAMPES DOMESTIQUES (REALISATION : MONACO ; SOURCE : BOUDELLAL, 2010).....	101
TABLEAU 20: COMPARAISON ENTRE LES CONSOMMATIONS D'UN ORDINATEUR PORTABLE ET FIXE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : BOUDELLAL, 2010)	103
TABLEAU 21: COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE TELEVISEURS (REALISATION : MONACO ; SOURCE : CURBAIN.BE)	103
TABLEAU 22: COMPARAISON DES TYPES DE CUISSON (REALISATION : MONACO ; SOURCE : BOUDELLAL, 2010)	104
TABLEAU 23: CONSOMMATION ELECTRIQUE ANNUELLE POUR L'ECLAIRAGE ET L'ELECTROMENAGER (REALISATION: MONACO ; SOURCE : CURBAIN.BE, 2012 ; GUIDETOPTEN.COM, 2012 ; GOOGLE.COM, 2012)	107
TABLEAU 24: LES QUATRE TYPES DE VENTILATION (REALISATION : MONACO, 2012)	109
TABLEAU 25: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES QUATRE TYPES DE VENTILATION (REALISATION : MONACO, 2012)	109
TABLEAU 26: PRINCIPAUX POLLUANTS DE LA COMBUSTION INCOMPLETE DU BOIS (REALISATION : MONACO ; SOURCE : AUBERT, 1999)	113
TABLEAU 27: RECAPITULATIF DES CONSOMMATIONS QUOTIDIENNES EN EAU DES MENAGES (REALISATION: MONACO, 2012).....	122
TABLEAU 28: IRRADIATION MOYENNE POUR UNE SURFACE INCLINEE DE 20° ET ORIENTEE A 15° EST (REALISATION : MONACO ; SOURCE : LOGICIEL CALSOL, 2012)	123
TABLEAU 29: TAUX DE COUVERTURE DE L'INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE (REALISATION : MONACO, 2012)	124

TABLEAU 30: CONSOMMATION ELECTRIQUE ANNUELLE TOTALE DU MENAGE (REALISATION : MONACO ; SOURCE : CURBAIN.BE, 2012 ; GUIDETOPTEN.COM, 2012 ; GOOGLE.COM, 2012).....	126
TABLEAU 31: COMPARAISON DU GISEMENT SOLAIRE D'UNE SURFACE IDEALEMENT INCLINEE (35°) AVEC UNE SURFACE INCLINEE A 55° (REALISATION : MONACO ; SOURCE : LOGICIEL CALSOL, 2012)	128
TABLEAU 32: VITESSE MOYENNE MENSUELLE DES VENTS A MONTELMAR (REALISATION : MONACO ; SOURCE : WINDFINDER.COM, 2012)	130
TABLEAU 33: RECAPITULATIF D'UNE JOURNEE CRITIQUE (REALISATION : MONACO, 2012)	137

TABLE DES GRAPHIQUES

GRAPHIQUE 1: PRECIPITATIONS MENSUELLES – MONTELIMAR, DROME (REALISATION : MONACO ; SOURCE : METEOFRACTANCE.COM, 2012).....	11
GRAPHIQUE 2: TEMPERATURES MENSUELLES - MONTELIMAR, DROME (REALISATION : MONACO ; SOURCE : METEOFRACTANCE.COM, 2012).....	11
GRAPHIQUE 3: HEURES D'ENSOLEILLEMENT - MONTELIMAR, DROME (REALISATION : MONACO ; SOURCE : METEOFRACTANCE.COM, 2012).....	12
GRAPHIQUE 4: EVALUATION DE L'INFLUENCE DE L'EPAISSEUR D'ISOLANT SUR LES BESOINS EN CHAUFFAGE (SOURCE : PLEIADES+COMFIE, 2012).....	36
GRAPHIQUE 5: INFLUENCE DU MODE DE VENTILATION SUR LES BESOINS ANNUELS EN CHAUFFAGE (SOURCE : PLEIADES+COMFIE, 2012).....	37
GRAPHIQUE 6: COMPARAISON DU MODE DE VENTILATION SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE (SOURCE : PLEIADES+COMFIE, 2012).....	37
GRAPHIQUE 7: PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES A MONTELIMAR (RHONE-ALPES, FRANCE) (REALISATION : MONACO, SOURCE : METEOFRACTANCE.COM, 2012).....	73
GRAPHIQUE 8: EVOLUTION DES TEMPERATURES A L'ETAGE EN CAS D'ABSENCE DE CHAUFFAGE (SOURCE : PLEIADES+COMFIE, 2012).....	121

AUTONOMIE EN SITE ISOLE

ETUDE D'UN PROJET DE REHABILITATION D'UNE HABITATION SANS EAU NI ELECTRICITE

Une maison sur une colline drômoise, voilà le point de départ de ce travail de fin d'études. Une maison qui a le mérite d'exister depuis plus de 150 ans, mais qui n'est plus habitée depuis longtemps. En cause, le mode de vie qu'elle imposerait à ses habitants. Car cette maison, suite à son isolement, n'est ni raccordée au réseau public d'électricité, ni à celui d'alimentation en eau, ni même au réseau public d'assainissement des eaux usées. Cette maison est là, et attend... Elle attend et se détériore jour après jour. En permettant cela, c'est toute une partie du patrimoine rural mondial que nous autorisons à disparaître.

A l'ère de la technologie, nous pouvons nous questionner. Les progrès scientifiques d'aujourd'hui ne peuvent-ils pas profiter aux réalisations d'hier ? Quel est leur potentiel et quelles en sont les limites ? A travers un cas concret de réhabilitation, ce travail se propose donc d'évaluer la faisabilité d'une autonomie totale en eau et en électricité du patrimoine bâti en site isolé.

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil Architecte par **MONACO Emilie**

Année académique **2011/2012**