

Conception de la Station Polaire Belge par simulation thermique dynamique : IBPSA FRANCE 2008 à Lyon

Roel De Coninck¹, Bertrand Labedan²

3E

¹Siège social : Rue du canal, 61, 1000 Bruxelles

²Agence Toulouse : 9 rue Faubourg Bonnefoy, 31 500 Toulouse

roel.deconinck@3e.eu, bertrand.labedan@3e.eu

RESUME : En 2004, le gouvernement belge a chargé la Fondation Polaire Internationale de concevoir et construire une nouvelle base de recherche en Antarctique. Cette base a été préfabriquée en Belgique et envoyée en Antarctique fin 2007 pour devenir opérationnelle en 2008. Depuis le tout début du projet il y a eu une volonté de créer une base autonome.

La première étape dans la conception a été de déterminer la forme générale du bâtiment. De nombreux tests en souffleries ont été réalisés pour étudier l'influence de la forme sur l'amoncellement de neige ainsi que les charges aérodynamiques dues au vent. Une deuxième étape a consisté en l'étude paramétrique des propriétés du bâtiment. Des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées en phase d'avant-projet avec le logiciel < Virtual Environment >. Sur base des résultats, il a été conclu que la base pourrait être maintenue dans des conditions confortables pendant l'été polaire en utilisant uniquement l'énergie solaire passive.

Un inventaire détaillé des sources d'énergies disponibles et des technologies de stockage a conduit au choix d'un concept énergétique reposant sur le solaire et l'éolien. L'utilisation active de l'énergie solaire pour faire fondre la neige et pour chauffer l'eau réduit considérablement la demande en électricité. La récupération des eaux usées des toilettes après traitement biologique réduit la consommation totale d'eau. Des éoliennes (48 kW de puissance) et 10 kW crête de panneaux photovoltaïques sont combinés à un système de stockage d'énergie électrique par batteries ou par hydrogène et permettent de fournir toute l'énergie électrique requise.

Un modèle TRNSYS a été réalisé en prenant compte tous les composants comme la consommation en eau du bâtiment, les équipements de recherche, les panneaux solaires et les systèmes de stockage.

MOTS-CLÉS : Simulation thermique dynamique, efficacité énergétique, énergie renouvelable

ABSTRACT : In 2004, the Belgian government commissioned the International Polar Foundation to design and construct a new research base in Antarctica, to become operational at the end of 2008. From the early start, there was an ambition to create a highly self-supporting research base.

The first step in the design was to determine the basic shape of the building. Numerous wind tunnel tests were carried out to define the impact of the shape on snow built-up and aerodynamic forces. A second step was a parametric study of the building properties. Quick and basic simulations were carried out with the software <Virtual Environment>. On the basis of the result of these simulations it was concluded that the base could be kept comfortable during the local summer season by sole use of passive solar energy.

A detailed inventory of possible energy production and storage technologies led to a solar/wind energy concept. The active use of solar energy for snow melting and water heating substantially lowers the electricity demand. The recuperation of wastewater for toilets after a bio-treatment reduces the overall water consumption. Wind turbines (48 kWp installed power) and a 10 kWp photovoltaic system will be combined with a battery or hydrogen storage in order to supply all the electricity needed.

A TRNSYS model has been built up, taking into account all components such as the building, water consumption, research facilities, wind turbines, photovoltaic arrays and storage.

KEYWORDS : Thermal dynamic simulation, energy efficiency, .renewable energy

1. INTRODUCTION

Le gouvernement belge a chargé la Fondation Polaire Internationale (www.polarfoundation.org) de coordonner les phases de conception et de construction de la nouvelle station de recherche.

Un des objectifs principaux du projet était de réaliser une base presque entièrement autonome dans son fonctionnement. Cela passe notamment par l'utilisation maximale d'énergies renouvelables sans pour autant compromettre la fonctionnalité, le confort ou la sécurité de la base. Une telle approche nécessite une méthodologie de conception intégrée, similaire à celles utilisées dans d'autres champs d'application technologique comme l'espace ou l'industrie, basée sur l'utilisation des simulations thermiques dynamiques.

Cet article présente l'étude de conception thermique de la base, réalisée à partir des simulations dynamiques, ainsi que le développement du concept énergétique à partir d'énergies renouvelables.

2. DESCRIPTION DU SITE

2.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

La nouvelle station de recherche belge remplacera l'ancienne base belge Roi Baudouin, construite en 1958 sur la plaque glaciaire à Breid Bay dans le Dronning Maud Land. La nouvelle station sera érigée sur la crête d'Usteinen (Utsteinen Ridge $71^{\circ}57'S$; $023^{\circ}21'E$), au pied des montagnes Sør Rondane dans le Dronning Maud Land. Cette situation est à 178 km à l'intérieur des terres depuis la base Roi Baudouin (1958 – 1967) et 55 km depuis l'ancienne base japonaise d'Asuka (1986 – 1992). A mi-chemin entre la station Syowa (687 km) et la station russe de Novolazarevskaya (431 km), elle s'étend sur une surface inoccupée de 1 072 km entre ces deux stations dans l'un des secteurs les moins occupés du continent antarctique.



Figure 1 : localisation de la nouvelle base et simulation visuelle de la base

Le site de construction proposé est situé sur une petite crête de granite, relativement plate et sortant de la couche de neige. La crête, orientée nord – sud, mesure 700 m de long et seulement quelques mètres de large. Elle dépasse d'une vingtaine de mètres la couche de neige dans la zone d'accumulation. La crête a une altitude de presque 1400 m au-dessus du niveau de la mer.

2.2. METEOROLOGIE

Une station météorologique automatisée (SMA) a été installée sur la crête en décembre 2004. La SMA mesure la température ambiante, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative et la durée d'ensoleillement. En raison de l'instabilité de la station météo et du manque de mesures de rayonnement solaire, les données ont du être complétées avec des données de Météonorm de manière à obtenir des valeurs horaires sur une année complète.

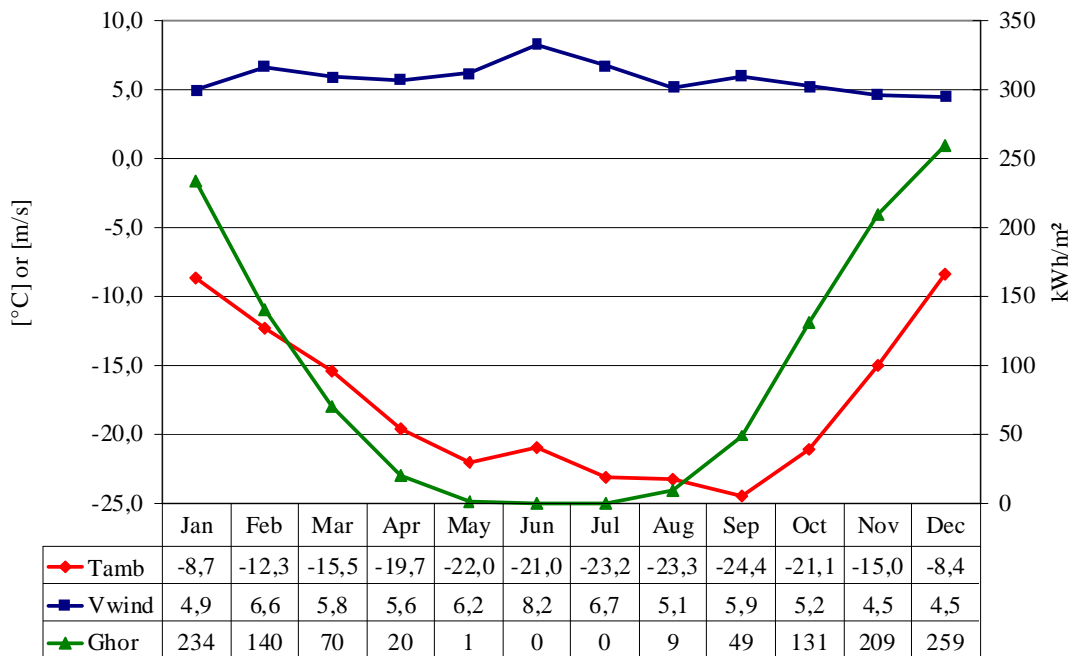


Figure 2 : température moyenne mensuelle et vitesse d'air (AWS, 2005) et rayonnement global horizontal (Meteonorm)

2.3. BESOIN ENERGETIQUE

Les principaux postes de consommations en énergie thermique sont liés au chauffage du bâtiment, à la fonte de neige/glace, à la production d'eau chaude sanitaire et au traitement de l'eau (chauffage du réservoir). Les principaux postes de consommation électrique sont liés aux équipements de bureau, aux pompes, à l'éclairage, la cuisine, le sauna et aux équipements de recherche.

La conception du bâtiment doit chercher à réduire au maximum la demande énergétique pour le chauffage et l'éclairage tout en assurant un bon confort climatique intérieur, et ce quelles que soient les conditions extérieures.

On distingue deux modes d'opération : mode été et mode hiver. En mode été, la base est occupée par environ 4 à 20 personnes. Cette période va de novembre à février (été local). En mode hiver, la base est inoccupée et les seules consommations d'énergie sont engendrées par les télémetries, les télécommunications et la protection antigel.

2.4. OPTIMISATION DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT

L'idée étant de réaliser une base la plus autonome possible, la conception du bâtiment s'est dès le début orientée vers la technique des maisons passives. Cela implique la mise en place de très hauts niveaux d'isolation thermique, de triple vitrage, d'un haut niveau d'étanchéité à l'air et d'un système de ventilation à haute efficacité. Les premières évaluations d'avant projet du bâtiment ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique Virtual Environment (<VE>). Des tests aérodynamiques en soufflerie ont été nécessaires pour déterminer l'érosion et l'accumulation de la neige ainsi que les charges sur le bâtiment dues au vent (tests réalisés par l'Institut Von Karman). Il y a eu un échange constant d'information entre les résultats des simulations thermiques et les résultats des tests aérodynamiques en soufflerie. Cependant, les caractéristiques topologiques, aérodynamiques et l'amoncellement de la neige n'ont eu d'influence que sur la forme et la géométrie de l'enveloppe du bâtiment. Le concept de bâtiment résultant est montré sur la Figure 3.

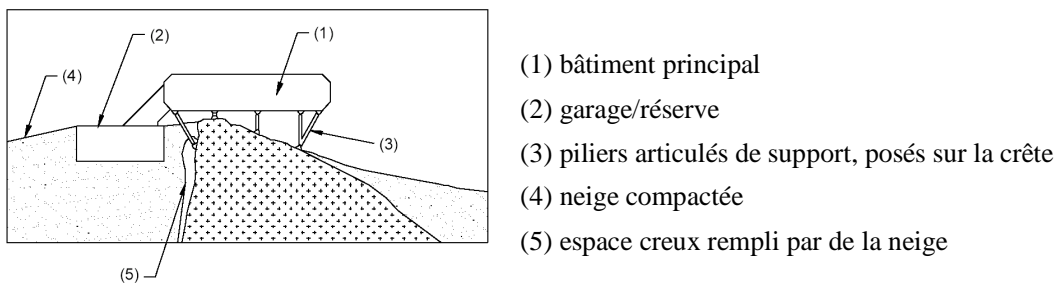


Figure 3 : principe de support du bâtiment

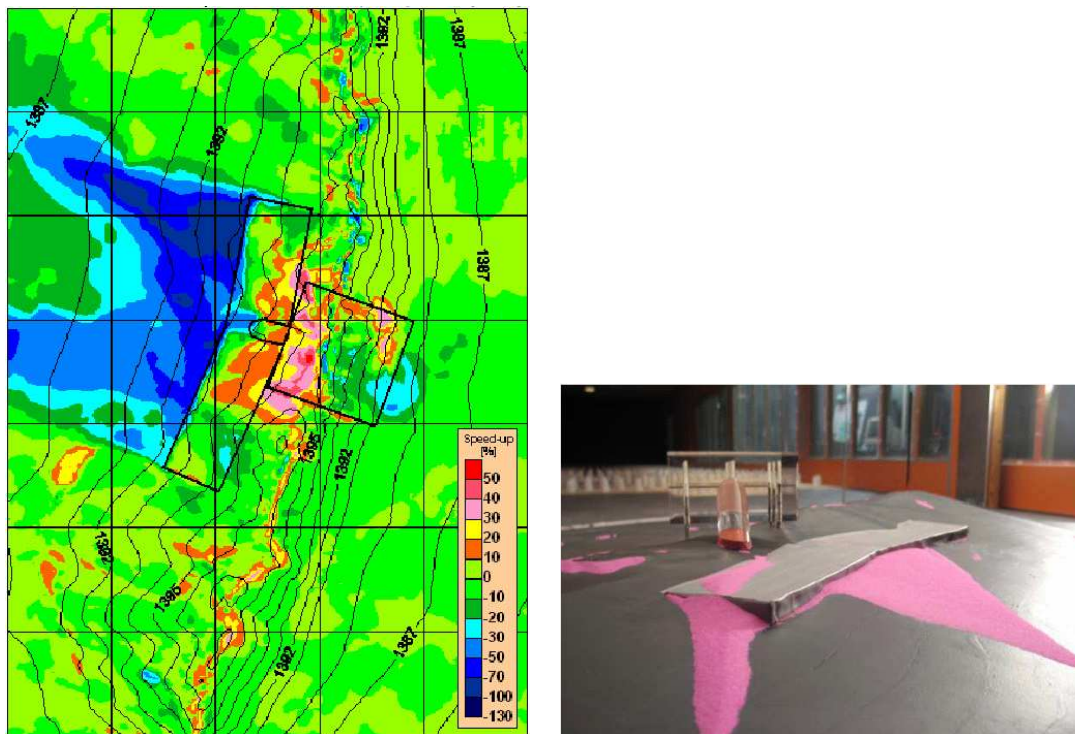


Figure 4 : carte de contour des vitesses du vent (à gauche) et essai de traînées de neige (à droite)

La base comprend un seul niveau. Dans le bâtiment, les utilisations suivantes sont prévues : hall, séjour, cuisine, bureau, chambres à coucher, sanitaires, infirmerie, poste de contrôle de la base et locaux techniques comme indiqué sur la Figure 5.

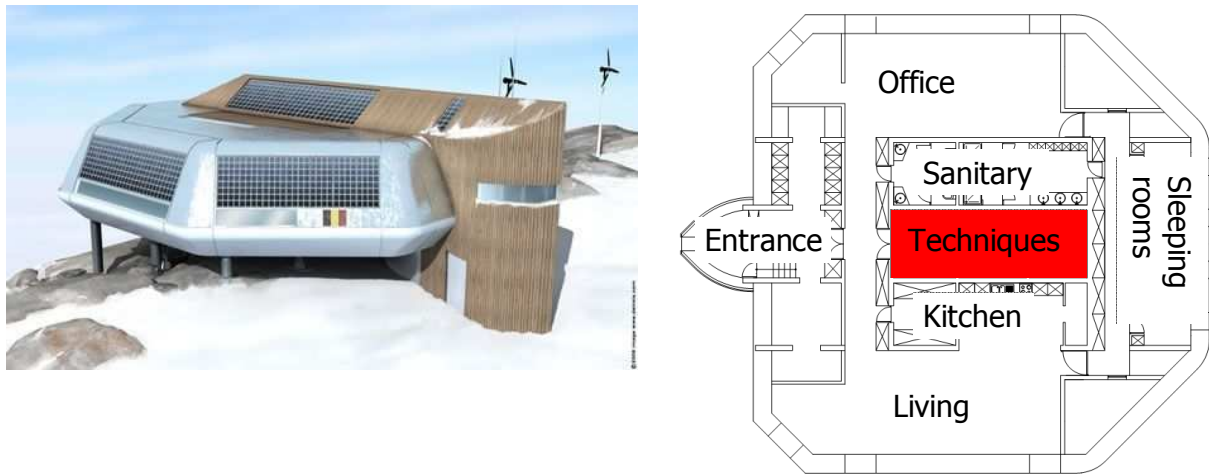


Figure 5 : plan de disposition générale du bâtiment (la grille est de 5m par 5m)

Le bâtiment a été simulé à l'aide d'un modèle de 10 zones thermiques dans <VE>. De nombreuses études paramétriques ont été réalisées pour étudier l'impact de différentes mesures sur la demande en énergie et sur le confort intérieur.

Les conclusions principales qui résultent des simulations du bâtiment sont résumées ci-dessous :

- De hauts niveaux d'isolation thermiques sont absolument nécessaires. Les valeurs des coefficients U prévus sont les suivantes :
 - Sol, murs extérieurs et toiture : $U = 0,07 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Pour obtenir cette valeur on utilise un matériau isolant en polystyrène expansé de 40 cm d'épaisseur
 - Vitrage (2 double vitrages) : $U = 0,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Avec de tels niveaux d'isolation, une bonne étanchéité à l'air et un système de ventilation avec récupération de chaleur à haut rendement (90%) les gains internes et solaires sont presque suffisants pour maintenir une température confortable en été.
- Il y a un risque considérable de surchauffe à cause des gains solaires très importants. Ce problème est difficile à résoudre car les apports solaires sont très importants alors que la température extérieure est très basse (-10°C). L'ouverture des fenêtres n'est donc pas possible et un free-cooling n'est pas suffisant car on ne peut pas souffler un air à une température trop froide et il n'est pas possible non plus d'augmenter le débit car l'air extérieur est très sec. Les études montrent que les solutions d'occultation solaire peuvent améliorer le confort mais elles augmentent les besoins de chaleur, alors que la solution d'un apport de masse thermique peut améliorer le confort et diminuer les besoins de chaleur. Pour limiter ces surchauffes il a été privilégié de disposer les fenêtres en toiture et d'avoir une surface plus limitée en façade.

- L'inertie thermique est un paramètre critique. Afin de réduire les coûts de transports, des solutions reposant sur l'utilisation du granit local ou sur les matériaux à changement de phases sont étudiées.

En mode opérationnel d'hiver, le noyau technique du bâtiment doit rester à des températures positives à tout moment. Pour cette raison, des panneaux d'isolation supplémentaires seront placés autour de ce noyau pendant la période de non-occupation de la base. Les besoins en chaleur restent très faibles, avec des pics maximums de 1,4 kW.

3. DEFINITION DU CONCEPT ENERGETIQUE

Afin d'avoir une première estimation de la consommation d'électricité, un inventaire détaillé des postes consommateurs d'électricité a été établi. Pour chacun de ces postes, une utilisation horaire a été estimée, en fonction de profils d'occupation de la base. Après combinaison de la charge d'utilisation et le nombre estimé d'occupants journaliers, une première évaluation brute de la consommation d'électricité a pu être établit.

La présence d'un vent constant permet l'utilisation d'éoliennes pour la production d'électricité. Etant donné que la base ne sera occupée qu'en été, des technologies solaires sont également envisagées. L'installation de panneaux photovoltaïques et de systèmes solaires thermiques pour le chauffage et la production d'eau par fonte de neige constituent des options intéressantes.

Les systèmes de production décentralisée basés sur des sources d'énergie renouvelable nécessitent un système de stockage d'énergie. Les batteries au plomb sont utilisées ici car elles constituent la solution la plus connue et la plus efficace d'un point de vue technique.

Toutes les applications fonctionnent soit directement à l'électricité soit par énergie solaire thermique avec un appoint électrique. Le bâtiment est chauffé à l'aide de résistances électriques situées dans le groupe central de ventilation. La fonte de la neige est réalisée par l'énergie solaire thermique ainsi que le chauffage de l'eau et du bio-réacteur. Un générateur électrique est fourni comme appoint du système d'énergie renouvelable. La Figure 6 représente le schéma de principe simplifié du concept thermique.

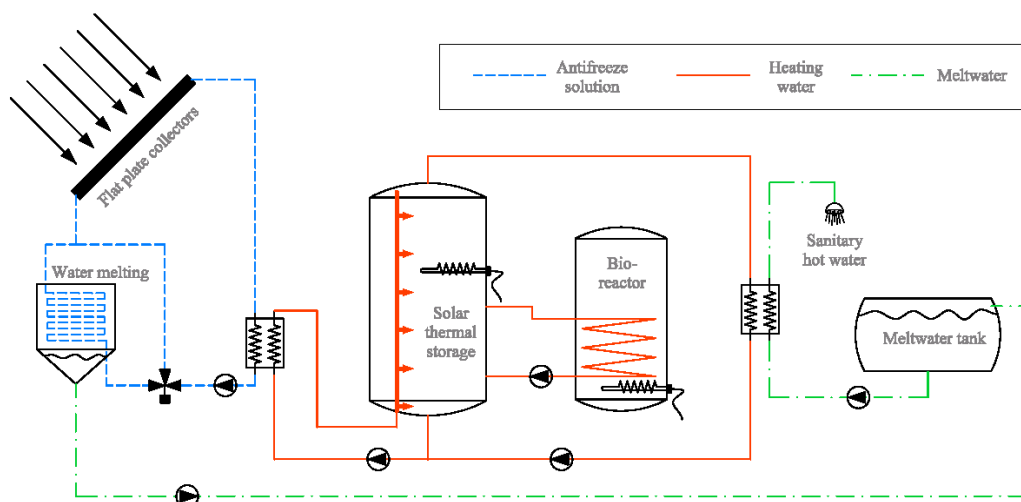


Figure 6 : schéma du concept thermique

4. CREATION DU MODELE DE SIMULATION INTEGRE

Tout le concept énergétique a été modélisé et simulé par le logiciel TRNSYS 16. Le modèle regroupe le bâtiment avec tous les composants électriques et thermiques présentés ci-dessus. Les simulations fonctionnent avec un pas de temps de 0,25 heures, ce qui permet d'obtenir sur une année des résultats avec une précision suffisante. Les sections suivantes expliquent de manière plus détaillée les parties principales du modèle TRNSYS.

Les optimisations de l'enveloppe du bâtiment ont été réalisées avec <VE> car ce logiciel permettait de tester plus de cas qu'avec TRNSYS et il a permis également de faire des études au niveau de l'éclairage naturel. Lors de l'étude intégrée des systèmes et du bâtiment, tout est réalisé à partir du même logiciel, TRNSYS, afin de tenir compte des interactions entre les systèmes énergétique et le bâtiment.

4.1. BATIMENT

En complément du modèle créé dans <VE>, un modèle de bâtiment avec le Type 56 de TRNSYS a été établi. Le modèle reprend toutes les hypothèses considérées dans le modèle initial de <VE>. Lorsque les apports internes et solaires ne sont pas suffisants pour garder les températures internes au-dessus de 20°C, un chauffage électrique dans le système de ventilation est activé.

En mode d'hiver, le noyau technique possède une isolation supplémentaire. C'est pour cette raison que deux modèles de bâtiment ainsi que deux simulations ont été nécessaires. Ainsi les résultats du dernier pas de temps des simulations d'été forment les conditions de départ pour les simulations d'hiver et vice versa.

En mode d'été, la température de consigne est de 20°C pour les pièces de séjour pendant la journée. Il n'y a pas de température de consigne imposée pendant la nuit (22h-07h). Les pièces de nuit sont constamment à 16°C.

4.2. SYSTEME SOLAIRE THERMIQUE

Un modèle d'un système solaire thermique a été créé dans TRNSYS. Il comprend les composants suivants : un processeur de rayonnement, les capteurs plans, les conduites (aller et retour, bâtiment intérieur et extérieur), les pompes avec leur contrôle, un échangeur de chaleur pour le circuit primaire, un réservoir de stockage stratifié et un second échangeur de chaleur pour la production directe d'eau chaude sanitaire. Le choix de capteurs plans plutôt que des capteurs à tubes sous vide plus efficaces s'explique par les problèmes d'accumulation de neige entre les tubes et la fonte qui en résulte.

Le réservoir de stockage comprend 10 niveaux de température. Il est du type TESS avec une stratification de la température au niveau du débit entrant. Ceci signifie que le flux de chaleur solaire entre dans le nœud qui possède la température la plus proche. Une résistance électrique est immergée au niveau du nœud 4 afin de garder la partie supérieure chaude en permanence.

Les pompes sont activées lorsque la température à la sortie des capteurs est de 10°C au-dessus de la température inférieure du ballon de stockage. La fonte de la neige a priorité sur le chauffage de l'eau. Lorsque la fonte de la neige par le soleil est activée (voir prochain paragraphe), la deuxième pompe sera arrêtée afin de ne pas refroidir le réservoir de stockage.

Un échangeur de chaleur à plaques produit l'eau chaude sanitaire de manière instantanée. Le profil de consommation de l'eau est introduit dans le modèle à partir d'un fichier externe. L'échangeur de chaleur règle le débit de manière à obtenir de l'eau sanitaire à 45°C. La solution actuelle a comme désavantage de causer une déstratification du réservoir de stockage à cause des températures de retour élevées.

4.3. FONTE DE NEIGE ET STOCKAGE D'EAU DE FONTE

L'eau est produite par la fonte de la neige dans un réservoir chauffée dans un garage, en dehors du bâtiment principal. Les parois du réservoir de neige sont chauffées à l'aide de l'énergie solaire avec l'électricité comme appoint. L'eau de fonte est pompée dans un réservoir de volume variable, située dans le noyau technique du bâtiment. Lorsque le niveau dans le réservoir est en dessous du seuil supérieur, le système de l'eau de fonte est activé sur l'énergie solaire. Lorsque l'énergie solaire est disponible, la chaleur est dirigée vers le réservoir de neige plutôt que vers le réservoir de stockage thermique. Aucune fonte d'origine électrique ne sera mise en route tant que le niveau de l'eau de fonte ne descend pas en dessous du seuil inférieur.

La fonte de la neige est modélisée d'une manière simplifiée. La solution antigel passe par un échangeur de chaleur, où il y a de l'eau qui coule dans la partie secondaire. L'eau rentre à une température d'1°C, ce qui est la température de contact estimée dans le réservoir de neige réel. La température de consigne pour l'eau de fonte ne doit pas être définie trop bas, sinon un supplément d'électricité sera nécessaire pour chauffer les conduits entre le garage et le bâtiment principal.

La chaleur est utilisée pour chauffer la neige de la température ambiante au point de fusion (0°C), fondre la neige et chauffer l'eau de 0°C à la température de consigne (5°C)

Un facteur d'efficacité est ajouté, afin de tenir compte des pertes de chaleur générales dans le processus.

4.4. EOLIENNES

Les éoliennes seront placées sur la crête. Pour des raisons de sécurité d'approvisionnement plusieurs petites éoliennes ont été choisies plutôt que des grands appareils.

Les valeurs de la vitesse du vent ont été converties aux valeurs des hauteurs du rotor avant les simulations, à l'aide d'un logiciel spécialisé qui prend en considération les propriétés du terrain. Le modèle de l'éolienne prend la courbe de puissance comme donnée d'entrée.

4.5. PRODUCTION D'ELECTRICITE PHOTOVOLTAÏQUE

Un système PV est intégré dans les façades du bâtiment. Toutes les directions (même sud) sont utiles étant donné que le soleil brille 24 heures par jour en été.

Le modèle actuel prend en considération les différentes orientations pour des panneaux PV différents. La surface PV entière est modélisée telle une surface orientée nord avec une inclinaison de 70°.

Les surfaces disponibles sur les façades du bâtiment étant limitées, il a été rajouté un champ photovoltaïque orienté nord sur le garage pour arriver à un total de 50 kWc.

4.6. STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ, GESTION DE LA BATTERIE ET GÉNÉRATEUR DE RÉSERVE

Étant donné que la production d'électricité dépend de sources d'énergie renouvelable variables, un stockage d'électricité est requis. La part d'énergie renouvelable dépend en grande partie de la capacité de stockage. Le modèle prend en considération un stockage de batteries fonctionnant avec du 48V. Ceci mène à 24 éléments de 2V en série et une série de cellules en parallèle afin d'atteindre une capacité totale de 6000 Ah. Les batteries sont des batteries acides au plomb stationnaires.

Le régulateur de la batterie fonctionne tel un onduleur courant alternatif/courant continu AC/DC. Lorsque la puissance DC (vent + PV) est plus grande que le besoin actuel, le surplus de puissance est transmis aux batteries tant que l'état maximum de charge (SoC) n'est pas atteint. Lorsque le besoin est plus grand que l'apport, les batteries prennent le relais, tant que la décharge actuelle ne dépasse pas la valeur maximum, ou tant que le SoC minimum n'est pas atteint.

Lorsque les batteries ne peuvent plus gérer le manque, le groupe électrogène doit démarrer. Puisque le groupe électrogène a une certaine puissance minimale de sortie (AC), il est possible qu'un surplus soit créé sur le courant AC. Ce surplus doit alors être ramené aux batteries. Étant donné que le type 48 utilisé pour ce modèle ne comprend pas une conversion AC/DC, un onduleur séparé est utilisé pour alimenter le courant DC par le surplus de puissance (DC). Lorsque le générateur tourne, il ne peut s'éteindre avant qu'un certain SoC soit atteint. Cette régulation crée une stabilité dans le système car elle évite une mise en marche/coupure du générateur. La chaleur restante du générateur n'est pas récupérée à cause du faible nombre d'heures de fonctionnement.

La consommation d'électricité est la somme du profil défini dans un fichier externe, de la puissance nécessaire pour chauffer le bâtiment et la puissance de réserve pour la fonte de la neige, le chauffage de l'eau et le chauffage du bio réacteur. Le modèle actuel ne prend pas en considération la consommation variable d'électricité grâce à une régulation d'éclairage dépendante de la lumière du jour. Cela sera atteint grâce à de futures modélisations améliorées.

4.7. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET RESULTATS

Une analyse de sensibilité est effectuée à l'aide de 3 paramètres variables : le nombre d'éoliennes, la capacité de stockage de batteries et la surface de PV. Les calculs paramétriques des permutations de ces variables mènent à 280 simulations. Un exemple de résultats de ces simulations est donné à la Figure 7.

L'analyse de sensibilité démontre l'impact important de la surface PV: la conséquence par rapport à l'augmentation de la surface PV est grande comparée à une augmentation de la capacité de batteries ou du nombre d'éoliennes.

Une petite surface de PV ne permet pas d'atteindre les performances souhaitées, même avec une grande capacité de stockage ou de nombreuses éoliennes. En revanche, une surface de PV importante peut être remplacée par une partie des éoliennes et la consommation de combustibles ne diminuera presque pas. Cette conclusion vaut également pour la capacité des batteries mais dans une moindre mesure.

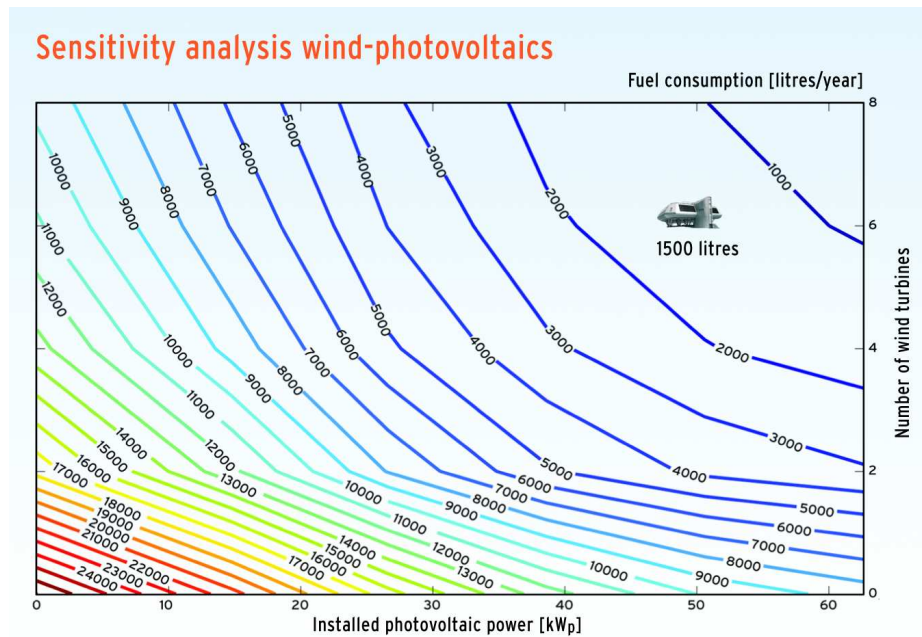


Figure 7 : Consommation annuelle de combustible de 1500 litres pour 6 éoliennes et 50 kWc de photovoltaïque

Le concept énergétique doit assurer un minimum de dépendance au combustible fossile pendant le fonctionnement. Le succès du concept est mesuré par la consommation annuelle de combustible. Chaque élément et le système complet de régulation influencent le résultat. Les résultats suivants sont valables pour le concept actuel de la station :

- 6 éoliennes de 6 kW
- 450 m² de panneaux PV, soit 50 kWc
- un banc de batteries acides au plomb d'une capacité totale de 300 kWh brut.
- 20 m² de collecteurs solaires thermiques
- 2 m³ de stockage solaire thermique
- 2 m³ de stockage d'eau de fonte
- Une consommation annuelle de combustible 1500 litres

Au regard de la production et consommation mensuelle pour cette configuration on constate que le générateur ne produit qu'une petite partie de la puissance nécessaire. La part de l'énergie renouvelable annuelle pour cette configuration est de 97 %.

L'efficacité et la puissance du collecteur thermique dépendent en grande partie de la température du collecteur, qui est bien plus basse pour la fonte de la neige que pour le chauffage de l'eau. C'est pour cette raison que donner la priorité à la fonte de la neige est une stratégie de régulation efficace car cela mène à des efficacités de collecteurs plus élevées.

Sur une semaine représentative, l'état de charge (SoC) d'un banc de batteries varie entre 60% et 100%. Le générateur démarre lorsque le SoC descend en dessous de 60% et charge les batteries jusqu'à ce qu'il atteigne 70%. Les éoliennes fournissent la plus grande partie de l'électricité (61%), à

tel point qu'une partie de la production éolienne n'est pas nécessaire et est déviée vers le système de dissipation d'énergie.

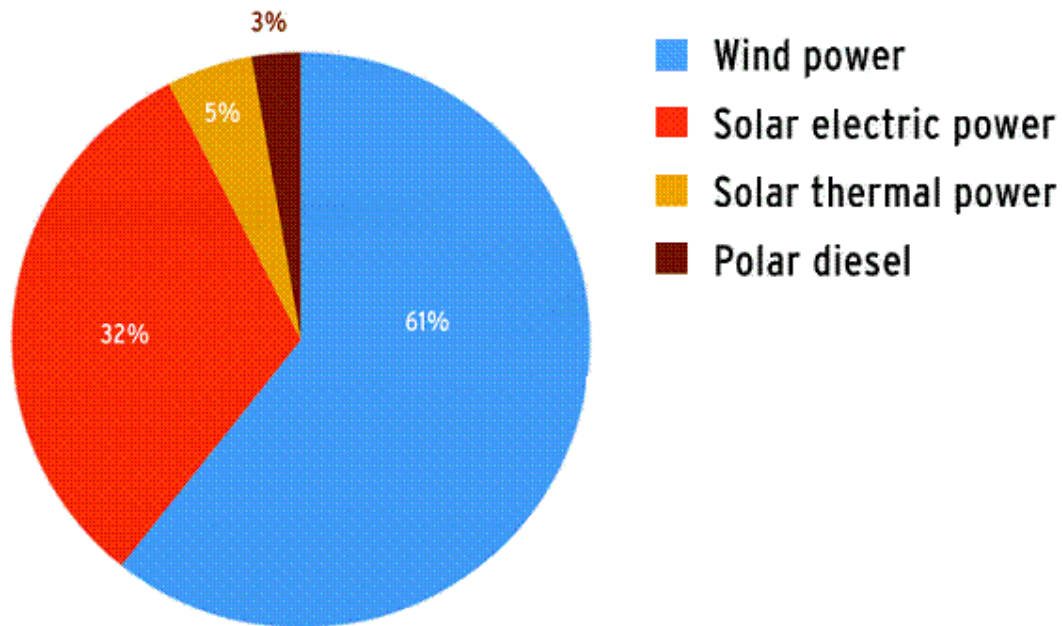


Figure 8 : Répartition des puissances énergétiques

5. CONCLUSIONS

Certaines expériences avec l'énergie renouvelable en Antarctique ont été faites ci et là dans le passé, mais aucune station ne se base sur l'énergie renouvelable comme source d'énergie principale. Cette étude a deux objectifs : d'une part, montrer de quelle manière une station de recherche basée sur l'énergie renouvelable peut être conceptualisée à l'aide d'outils de simulation dynamique ; d'autre part de déterminer le concept énergétique qui minimise la dépendance des combustibles fossiles.

Puisque le bâtiment est le premier consommateur de chaleur, une approche de création à deux étapes a été utilisée. Premièrement, les concepts généraux de bâtiment ont été évalués avec Virtual Environnement. Cette étape a déterminé l'impact de l'isolation, le vitrage, le zoning, la masse thermique, sur le besoin de chaleur et le confort intérieur. Deuxièmement, un modèle TRNSYS 16 a été construit, qui comprend les éléments thermiques et électriques.

Le modèle TRNSYS est utilisée pour évaluer la sensibilité de chaque paramètre. Le nombre d'éoliennes et de panneaux PV, la capacité des batteries, les capteurs solaires thermiques, peuvent être modifiés afin d'étudier leur effet sur la consommation annuelle de combustible.

Les résultats montrent qu'un concept énergétique assuré par une part d'énergie renouvelable d'au moins 97% est réalisable lorsqu'un bâtiment est hautement isolé et étanche à l'air et qui utilise de manière intelligente l'énergie solaire passive combinée à l'énergie éolienne, des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, ainsi qu'un stockage de batteries acides/au plomb.

6. BIBLIOGRAPHIE

Solar Energy Laboratory, 2005 – TRNSYS 16, University of Wisconsin-Madison

Duffie J.A. and Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edition, John Wiley & sons, Inc., New York, 1991

Meteotest (1997), Meteonorm 3.0. *Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology*

Integrated Energy Solutions (2006), <Virtual Environment 5.5>, Dynamic Simulation Software for Building Design and Innovation