

RETScreen® International

Centre d'aide à la décision
sur les énergies propres

e-Formation

Module de formation
NOTES DU FORMATEUR

ANALYSE DE PROJETS DE POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUE

COURS D'ANALYSE DE PROJETS D'ÉNERGIES PROPRES

Ce document donne la transcription de la présentation orale (voix et acétates) pour ce module de formation et peut être utilisé comme notes du formateur. Cette présentation orale donne une vue d'ensemble de cette technologie et un aperçu des algorithmes utilisés dans le modèle RETScreen. Le matériel de formation est disponible gratuitement sur le site Web du Centre d'aide à la décision sur les énergies propres RETScreen® International : www.retscreen.net.

Support à la clientèle
RETScreen®

www.retscreen.net



rets@nrcan.gc.ca

+1-450-652-5177



+1-450-652-4621

This publication is also
available in English.

Centre de la technologie
de l'énergie de CANMET
- Varennes (CTEC)

En collaboration avec:



Exonération

Cette publication, diffusée à des fins uniquement didactiques, ne reflète pas nécessairement le point de vue du gouvernement du Canada et ne constitue en aucune façon une approbation des produits commerciaux ou des personnes qui y sont mentionnées, quels qu'ils soient. De plus, pour ce qui est du contenu de cette publication, le gouvernement du Canada, ses ministres, ses fonctionnaires et ses employés ou agents n'offrent aucune garantie et n'assument aucune responsabilité.

ACÉTATE 1 : Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique

Ceci est le module de formation *Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique* du cours d'analyse de projets d'énergies propres de RETScreen International. Dans cette présentation, nous examinerons les installations de pompes à chaleur géothermique. Il s'agit de systèmes utilisant la différence de température entre l'air et le sol pour chauffer ou rafraîchir les bâtiments selon la saison. Il ne s'agit pas de systèmes à haute température allant chercher la chaleur d'origine volcanique mais plus simplement d'échangeurs de chaleur enfouis dans le sol. Cette technologie est parfois appelée géothermie de surface ou géothermie à basse température. Ce bâtiment, situé à Philadelphie en Pennsylvanie, aux États-Unis, utilise un tel système d'échange de chaleur qui alimente une série de 28 pompes à chaleur assurant le chauffage et la climatisation des locaux.



Acétate 1

ACÉTATE 2 : Objectifs

Ce module vise 3 objectifs: le premier est de présenter les principes de base d'un système de pompe à chaleur à géothermie de surface; le deuxième est de décrire les enjeux importants à considérer lors de l'analyse de tels projets; le dernier est de présenter le modèle RETScreen International pour projets de pompe à chaleur géothermique (PCG).



Acétate 2

ACÉTATE 3 : Qu'est-ce que les systèmes de PCG fournissent?

En hiver, un tel système extrait de la chaleur à basse température du sol ou d'une source d'eau et l'élève à une température suffisante pour chauffer les locaux, au moyen d'une pompe à chaleur qui utilise un compresseur électri-



Acétate 3



ACÉTATE 3 : Qu'est-ce que les systèmes de PCG fournissent? (suite)

que. En été, le cycle de la pompe à chaleur est inversé et les locaux sont refroidis alors que le sol absorbe la chaleur rejetée par le système en mode climatisation.

La chaleur produite par les compresseurs peut aussi servir à la production d'eau chaude sanitaire de façon économique. Enfin, dans les régions nordiques, de tels systèmes peuvent servir à stabiliser les fondations de bâtiments construits sur le pergélisol, en l'empêchant de fondre tout en produisant de 20 à 50 % des besoins thermiques du bâtiment.

Les systèmes de pompe à chaleur géothermique présentent bien d'autres avantages à utiliser la source gratuite d'énergie thermique qu'est le sol, à commencer par le fait qu'il s'agit de la technologie de chauffage et de climatisation ayant les meilleurs rendements énergétiques.

Ensuite, il peut s'agir du système offrant le plus bas coût global sur sa durée de vie. En effet, même si un système de pompe à chaleur géothermique représente un coût d'investissement plus important qu'une installation classique de chauffage et de climatisation, ses coûts d'exploitation sont beaucoup plus bas. Cela est dû aux coûts d'entretien qui sont généralement plus faibles, mais surtout au rendement énergétique élevé qui réduit la consommation d'énergie achetée.

Une installation de pompe à chaleur géothermique occupe très peu d'espace, car une seule unité assure les besoins de chauffage et de climatisation de chaque zone du bâtiment. Les transferts d'énergie dans le bâtiment et avec le sol sont assurés au moyen d'une boucle d'eau ou d'un mélange antigel. On évite donc l'utilisation de volumineux conduits d'air. On n'a plus besoin non plus d'installer d'équipements à l'extérieur ou en toiture, ce qui les expose aux intempéries ou au vandalisme. On n'a plus besoin non plus d'avoir une chaufferie centrale.

Comme un système géothermique est soumis à la température du sol qui subit peu de variations en comparaison de la température extérieure, la capacité de chauffage ou de climatisation des pompes à chaleur est beaucoup plus constante. Comme on dimensionne généralement des installations de chauffage et de climatisation selon des conditions extrêmes, on comprend que grâce à la géothermie, on pourra installer des pompes à chaleur de plus faible capacité que si elles devaient utiliser la température ambiante extérieure.

Enfin, un système de pompe à chaleur géothermique offre un meilleur confort et une meilleure qualité d'air intérieur. Les raisons en sont les suivantes: avec une pompe à chaleur, on chauffe un plus grand débit d'air à plus basse température qu'avec un système à combustion. En mode climatisation, une pompe à chaleur géothermique peut produire une température plus basse qu'un système classique de climatisation, ce qui la rend plus efficace pour enlever l'humidité de l'air. Enfin, comme de tels systèmes comprennent généralement des unités indépendantes, le contrôle de température et d'humidité de chacune des zones est beaucoup plus facile et efficace que lorsque tout doit être contrôlé à partir d'une seule source de chauffage ou de refroidissement pour tout le bâtiment.

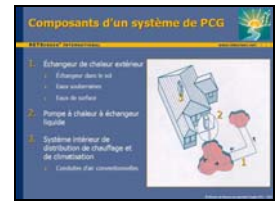
Il faut aussi tenir compte du fait qu'un système de pompe à chaleur géothermique permet de réduire l'appel de pointe de puissance électrique, en été comme en hiver. Les appels de puissance de pointe coïncident généralement avec les températures extrêmes d'hiver et d'été. Comme les pompes à chaleur géothermiques sont plus efficaces que n'importe quel autre système électrique et qu'en plus, elles bénéficient d'une source de température moins variable, leur utilisation conduit à des profils de charge plus constants, ce qui facilite la gestion des réseaux électriques.

ACÉTATE 3 : **Qu'est-ce que les systèmes de PCG fournissent? (suite)**

En haut à gauche, on voit la photo d'une maison de démonstration en Nouvelle Angleterre qui utilise, en plus de la géothermie, un système photovoltaïque, un chauffe eau solaire et une architecture solaire passive. Cette maison a été inaugurée au début des années 1990 comme une vitrine des technologies d'efficacité énergétique, qui pourraient être utilisées dans la région de Boston. L'autre photo montre à quoi ressemble une pompe à chaleur géothermique résidentielle.

ACÉTATE 4 : **Composants d'un système de PCG**

Un système de pompe à chaleur géothermique comprend 3 éléments: le système d'échange de chaleur avec le sol, la pompe à chaleur elle-même et le système de distribution de chaleur ou de refroidissement du bâtiment.



Acétate 4

Le système d'échange de chaleur avec le sol peut être un réseau de tuyauterie enfoui verticalement ou horizontalement dans le sol ou encore déposé dans le fond d'un lac ou d'un cours d'eau; on utilise alors des eaux de surface. Le système géothermique est alors à boucle fermée: c'est un fluide intermédiaire qui extrait ou rejette de la chaleur au sol. En mode chauffage, le fluide est plus froid que le sol ou l'eau; en mode climatisation, il est plus chaud. Ce fluide peut être un mélange d'eau et d'antigel. Il circule de la pompe à chaleur, située à l'intérieur du bâtiment, vers la boucle de l'échangeur de chaleur, situé à l'extérieur, puis revient à la pompe à chaleur.

Certains systèmes fonctionnent en boucle ouverte, c'est-à-dire que l'on utilise directement de l'eau d'une nappe souterraine pour échanger de la chaleur. Dans le cas d'une boucle ouverte, on utilise un échangeur de chaleur intermédiaire car on utilise généralement une boucle secondaire entre la pompe à chaleur et la boucle ouverte.

Les pompes à chaleur utilisées dans un système à géothermie de surface doivent donc être conçues pour utiliser un liquide comme source ou comme puits thermique. Ce type de pompe à chaleur est différent des unités de toiture ou des climatiseurs de fenêtre qui utilisent directement l'air extérieur comme source ou comme puits de chaleur. Au moyen d'un compresseur, on fait subir un cycle d'évaporation et de condensation à un gaz réfrigérant qui permet de relever le niveau de température d'une source de chaleur. Ainsi, pour maintenir un bâtiment à 20 °C, on pourra aller chercher de la chaleur dans le sol en dessous de 5 °C par exemple, ou encore, en mode de climatisation, y rejeter de la chaleur à plus de 25 °C.

Pour distribuer la chaleur ou refroidir le bâtiment, on agit directement sur l'air intérieur, ce qui permet d'en contrôler l'humidité en mode climatisation. Dans les bâtiments commerciaux, on utilise plusieurs pompes à chaleur sur la même boucle d'échange de chaleur avec le sol, ce qui facilite le contrôle du confort de chaque zone du bâtiment et permet des échanges de chaleur entre les zones. Par exemple, celles exposées au soleil ou ayant de fortes charges thermiques peuvent rejeter de la chaleur dans la boucle, au bénéfice de zones plus exposées au froid et ayant besoin de chauffage.

ACÉTATE 5 : Pompe à chaleur à échangeur pour liquide

Regardons plus en détail la pompe à chaleur qui est utilisée dans un système géothermique.

Comme on l'a mentionné précédemment, c'est un cycle d'évaporation et de condensation d'un gaz réfrigérant qui permet, au moyen d'un compresseur électrique, de relever le niveau de température d'une source de chaleur.

En mode chauffage, la chaleur du sol sert à évaporer à basse température le fluide à basse pression. La vapeur est aspirée par le compresseur et s'échauffe en augmentant de pression. En refroidissant la vapeur à haute pression, elle se condense, libérant à plus haute température la chaleur de condensation du frigorigène. Pour refroidir le condenseur, on utilise l'air intérieur du bâtiment. C'est ainsi que le chauffage est assuré.

Pour terminer le cycle du fluide réfrigérant, le fluide condensé à haute pression traverse une valve d'expansion qui abaisse sa pression pour qu'il puisse s'évaporer à plus basse température.

Comme la pompe à chaleur utilisée dans un système géothermique agit généralement directement sur l'air intérieur du bâtiment, en se servant de la boucle de liquide échangeant la chaleur avec le sol, on l'appelle pompe à chaleur de type « eau-air ». Le cycle d'une telle pompe à chaleur peut être renversé, ce qui permet alors de faire fonctionner l'installation en mode climatisation. Dans ce mode, c'est l'échangeur avec l'air du bâtiment qui devient l'évaporateur où l'air est refroidi. Le condenseur qui rejette de la chaleur est l'échangeur en contact avec le liquide de la boucle géothermique. C'est un circuit de diversion activé par une valve de contrôle qui permet de renverser le mode d'opération de la pompe à chaleur.

Un système géothermique utilise de l'électricité pour activer le compresseur de la pompe à chaleur, les ventilateurs à l'intérieur du bâtiment, les pompes de circulation des boucles d'échange avec le sol et dans le bâtiment, et les systèmes de contrôle. En général, on produit 2 à 4 fois plus d'énergie thermique ou frigorifique que l'on ne consomme d'électricité. Cela signifie que ces systèmes ont des rendements de 200 à 400 %, bien supérieurs aux résistances électriques dont le rendement maximal est de 100 %. Il est supérieur également aux systèmes classiques de climatisation. Un système géothermique, en comparant d'installations classiques de pompe à chaleur ou de climatisation, permet des économies d'énergie de 30 à 70 % en chauffage et de 20 à 50 % en climatisation. Un système géothermique peut aussi se comparer avantageusement aux autres systèmes de chauffage, même aux systèmes les plus performants au gaz naturel.

Tous les composants de la pompe à chaleur sont en général regroupés sur un même châssis. De telles unités ont généralement des capacités de réfrigération de 1 à 10 tonnes (soit 3,5 à 35 kW de réfrigération). De telles capacités sont généralement suffisantes pour combler les besoins de petits bâtiments ou d'une zone d'un plus grand bâtiment.

Lorsqu'il y a besoin d'eau chaude sanitaire, on peut équiper la pompe à chaleur d'un échangeur auxiliaire, appelé « désurchauffeur », qui permet d'extraire une partie de la chaleur du gaz comprimé avant qu'il ne condense. Un tel système permet généralement de combler les besoins d'eau chaude en été et en partie en hiver. Si on veut produire de l'eau chaude sanitaire uniquement avec le système géothermique, en particulier aux saisons où il y a à la fois peu de besoins de chauffage et de climatisation, l'installation devra comprendre un système de contrôle plus sophistiqué et un échangeur de chaleur additionnel.



Acétate 5

ACÉTATE 6 : Types d'échangeurs de chaleur



Acétate 6

Comme on l'a mentionné précédemment, il y a plusieurs méthodes d'échanger de la chaleur avec le sol. Pour les systèmes à boucle fermée, le réseau de tuyauterie peut être enfoui dans le sol soit à l'horizontale, soit dans un ou plusieurs forages verticaux. Ces forages peuvent avoir des profondeurs de l'ordre de 50 à 150 m. Un tuyau fait faire un aller-retour au fluide jusqu'au fond du puits et chaque boucle est raccordée à un réseau de tuyaux collecteurs qui relient les puits l'un à l'autre en parallèle. Un matériau de remplissage assure le contact thermique entre le sol et la boucle de liquide, à l'intérieur des puits. Pour éviter la contamination de la nappe phréatique on peut devoir utiliser un matériau scellant, plus cher et offrant un moins bon transfert thermique. Selon la réglementation en vigueur, on utilise souvent le matériau scellant seulement pour les 6 à 10 premiers mètres du puits, ce qui réduit les risques de contamination par les eaux de surface, tout en optimisant les coûts et les performances thermiques du forage.

Dans un échangeur horizontal, le réseau de tuyauterie est enfoui à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 m. Plusieurs tranchées sont raccordées entre elles par 2 tuyaux collecteurs.

Les tuyaux peuvent être disposés de différente façon dans chaque tranchée : il peut y avoir un seul tuyau, ou alors une boucle aller-retour avec les 2 tuyaux l'un à côté de l'autre ou l'un au-dessus de l'autre, séparés d'une distance de l'ordre de 50 cm. Certains projets utilisent jusqu'à 4 tuyaux dans une seule tranchée ou un tuyau enroulé en spirale, cette dernière configuration offrant certains avantages lorsque la surface de terrain disponible est limitée mais revenant plus cher en tuyauterie.

En générale, avec un échangeur enfoui horizontalement dans le sol, on utilisera entre 35 et 55 m de tuyauterie par kW de capacité frigorifique de la pompe à chaleur. Les tranchées sont rebouchées avec le sol naturel.

On a recours à des forages verticaux en terrains rocheux, lorsque la surface de terrain est réduite ou lorsque l'on ne veut pas endommager le paysage naturel. C'est cette solution qui est généralement adoptée pour les grands bâtiments. Lorsqu'elle est réalisable, la configuration d'un échangeur horizontal est souvent celle qui revient le moins cher, si on dispose d'une grande surface de terrain. C'est pourquoi elle est adoptée pour les petits bâtiments.

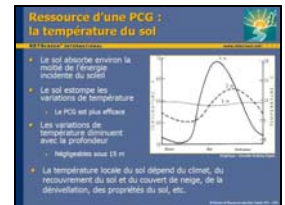
Les échangeurs avec puits vertical, plus profonds, sont moins soumis aux variations saisonnières de la température du sol que les échangeurs horizontaux. Aussi, les pompes à chaleur auront une efficacité plus constante au cours de la saison, ce qui permet de réduire la longueur de tuyauterie d'un réseau à puits verticaux par rapport à la longueur nécessaire avec un échangeur horizontal.

Dans un système à boucle ouverte, on utilise directement l'eau d'une nappe aquifère pompée dans un puits et rejetée dans un autre, appelé « puits d'injection ». Souvent, on utilise un circuit secondaire entre la pompe à chaleur et l'eau de la nappe, ce qui nécessite l'utilisation d'un échangeur de chaleur intermédiaire qui protège l'échangeur de la pompe à chaleur contre la corrosion, l'encrassement ou l'abrasion causés par les particules dont l'eau de la nappe peut être chargée.

Cette pratique est la plus simple et la moins compliquée de bénéficier de la géothermie. Cependant, pour des raisons de protection des nappes aquifères, il se peut qu'elle devienne de plus en plus restreinte par les règlements. Il est aussi possible d'utiliser des eaux de surface. On utilisera un réseau de tuyauterie disposé au fond d'un cours d'eau ou d'un lac. Les travaux de terrassement sont alors réduits. Une dernière configuration de boucle ouverte peut être celle d'un puits unique, ayant typiquement 15 cm de diamètre et pouvant atteindre 450 m de profondeur et dans lequel on pompe l'eau au point le plus profond puis la retourne dans le haut du puits.

ACÉTATE 7 : Ressource d'une PCG : la température du sol

Dans le type de projet auquel nous nous intéressons, c'est-à-dire la géothermie de surface, la chaleur qui provient du centre de la Terre n'entre en jeu que de manière insignifiante. On se sert plutôt du sol comme d'une masse thermique qui absorbe l'énergie solaire et la chaleur que l'on peut y injecter en été pendant la saison de climatisation, pour la réutiliser ensuite pendant la saison de chauffage.



Acétate 7

Le sol perd aussi beaucoup de chaleur vers l'atmosphère ou par rayonnement vers le ciel. La surface du sol suit donc les variations de température saisonnières. Cependant, plus on s'enfonce dans le sol, plus l'amplitude de ces variations diminue, et à une profondeur de 15 m on considère que le sol est à une température constante, dont la valeur est généralement légèrement supérieure à la température moyenne annuelle au sol. Ce léger écart peut dépendre du climat, de la végétation, de la couverture du sol, de sa pente, de la quantité de neige et des propriétés du sol en général.

Ce phénomène est illustré par le graphique suivant qui montre les variations de température à différentes profondeurs dans le sol, à Ottawa, la capitale du Canada. À 30 cm de profondeur, durant les mois d'hiver, la température atteint un minimum de -1 °C puis, vers la fin de l'été, un maximum de 20 °C. Cette amplitude est réduite de moitié à 2 m de profondeur, pour disparaître pratiquement dès 5 m de profondeur. On remarquera également que plus on s'enfonce dans le sol, plus les températures extrêmes ont du retard par rapport à celles atteintes par l'air ambiant. À 5 m de profondeur, on est presque en opposition de phase, le sol est à son plus frais au début de l'été. Ce phénomène est dû au temps de transfert de l'onde de chaleur dans le sol.

On comprend donc combien l'inertie du sol peut jouer en faveur des pompes à chaleur géothermique, à la différence des autres machines qui ne disposent que de l'air ambiant. En effet, la pompe à chaleur géothermique dispose d'une source ou d'un puits de chaleur à une température constante et proche de celle que l'on désire maintenir à l'intérieur du bâtiment. Il est donc normal que sa capacité soit plus constante et que son coefficient de performance soit bien supérieur à celui d'une machine qui doit fournir les plus fortes charges de climatisation alors que l'air ambiant est à sa température la plus élevée et les plus fortes charges de chauffage alors que les températures ambiantes sont des plus basses.

ACÉTATE 8 : Exemples de coûts d'un système de PCG

La viabilité financière d'un projet de géothermie de surface est très différente d'un projet à un autre. Prenons les deux exemples suivants de 2 projets, l'un en Finlande, l'autre au Connecticut aux É.-U., où on compare une installation de pompe à chaleur géothermique à chacune des options classiques qui seraient normalement adoptées dans chacun de ces marchés.



Acétate 8

En Finlande, la préoccupation est le chauffage et la climatisation est considérée comme un luxe un peu superflu. On comparera donc le système géothermique à une simple chaudière électrique, sans système de climatisation. Comme dans la plupart des pays européens, le chauffage utilise un système à eau chaude. Pour la maison finlandaise de 150 m², le système géothermique coûte 13 000 \$, soit 5 000 \$ de plus que le système de chauffage classique, mais utilise 3 fois moins d'électricité, l'équivalent d'économies annuelles de 450 \$. Malgré des temps de retour simple sur investissements supérieurs à 10 ans, la géothermie occupe près de 10 % du marché résidentiel en Finlande. Les gens souhaitent se protéger contre les hausses des coûts de l'énergie et considèrent la géothermie comme une technologie de développement durable.



ACÉTATE 8 : **Exemples de coûts d'un système de PCG (suite)**

La maison américaine, quant à elle, a une surface de 275 m² et serait normalement équipée d'une chaudière à air chaud au mazout et de la climatisation. À 20 000 \$, l'installation géothermique coûte 30 % plus cher que l'installation classique. Elle génère des économies de 60 % mais qui ne correspondent qu'à une baisse de 30 % des coûts d'approvisionnement énergétique. L'option géothermique est encouragée par le distributeur local d'électricité qui offre un rabais tarifaire aux maisons mieux isolées et équipées d'un système géothermique.

Ces deux exemples montrent que l'option géothermique augmente les coûts d'investissement dans les systèmes mécaniques d'un bâtiment. En général, pour une maison individuelle, l'investissement est le double environ de celui d'un système central classique. Il est 20 à 40 % plus élevé que celui d'unités de toiture à volume constant et près de 20 % plus cher que des systèmes centraux ou multizones utilisant un réseau d'eau froide. Ces deux exemples montrent les importantes économies d'énergie réalisées en exploitant ces systèmes, mais ne donnent aucune indication des autres avantages, par exemple, au niveau des frais d'entretien plus faibles.

ACÉTATE 9 : **Enjeux d'un projet de pompes à chaleur géothermique**

Comme nous le disions précédemment, la viabilité financière d'un projet de géothermie est très différente d'un projet à un autre. Lorsque l'on évalue la faisabilité d'une telle installation, il y a plusieurs aspects à bien surveiller.



Acétate 9

D'abord, au plan financier, il sera plus intéressant de viser d'abord des installations devant répondre à des besoins de climatisation en plus de ceux de chauffage. En effet, l'installation remplacera non seulement le système de chauffage classique, mais en plus, le système de climatisation, soit autant de coûts supplémentaires à mettre au crédit du projet géothermique. Ensuite, comme le système géothermique est plus efficace que le système classique, il y aura plus d'économies à son exploitation si on l'utilise plus longtemps dans l'année.

La géothermie est également plus intéressante dans les climats où il y a d'importantes variations de température car en bénéficiant d'une source à température plus stable, la pompe à chaleur géothermique sera d'autant plus performante en comparaison des pompes à chaleur utilisant l'air extérieur et dont le rendement baisse considérablement aux températures extrêmes. En plus, il s'agit de climats où la demande globale de chauffage et de climatisation est plus élevée que dans des climats tempérés, ce qui rentabilise encore plus l'avantage d'un système à rendement énergétique plus élevé.

S'il existe déjà dans un bâtiment un système de chauffage et de climatisation qui n'a pas besoin d'être remplacé, il sera très difficile de justifier une installation géothermique. Il est beaucoup plus intéressant de viser des projets de construction neuve, d'autant plus que l'enfouissement de l'échangeur de chaleur est facilité au moment de creuser les fondations du bâtiment. On peut aussi considérer l'option géothermique lorsque les installations de CVAC doivent faire l'objet d'importantes rénovations.

ACÉTATE 9 : **Enjeux d'un projet de pompes à chaleur géothermique (suite)**

Si le chauffage est le besoin dominant, l'option géothermique sera favorisée par de bas coûts de l'électricité et des coûts élevés du gaz ou du mazout. Si ce sont les besoins de climatisation qui prévalent, alors ce seront de hauts coûts de l'électricité qui favoriseront les pompes à chaleur géothermiques par rapport aux climatiseurs classiques moins efficaces. Si les besoins en chauffage et en climatisation sont tous deux importants, ce qui favorisera l'option géothermique sera un bas coût de l'énergie électrique, couplé à des tarifs élevés pour la puissance appelée en période de pointe.

L'installation de l'échangeur dans le sol est le point le plus critique d'une installation de géothermie. Le type de sol aura non seulement une influence sur les coûts de forage ou d'enfouissement mais également sur la facilité d'y obtenir un bon transfert thermique. Pour pouvoir réaliser un système à boucle ouverte, la contrainte la plus importante pourra être les règlements de protection de l'environnement. Une bonne analyse du sous-sol est donc nécessaire dans une étude de faisabilité d'un projet de géothermie, sinon on fera face à une très grande incertitude des coûts finaux et des performances réelles du projet. S'il existe des entreprises locales ayant de l'expérience en forage ou pour enfouir de la tuyauterie ou des drains dans le sol, cela pourra réduire les frais d'installation de l'échangeur. Comme la tuyauterie souterraine de l'échangeur sera très difficile d'accès après la construction, il vaut vraiment la peine d'investir dans des matériaux et un soin d'installation de la plus haute qualité.

Lorsqu'il y a un déséquilibre important entre les besoins de chauffage et ceux de climatisation, on peut réduire les coûts de l'échangeur géothermique en décidant de dimensionner celui-ci pour le plus faible des deux besoins. On devra, selon le cas, prévoir un système de chauffage auxiliaire pour les périodes de pointe ou un système auxiliaire d'évacuation de la chaleur en mode climatisation. Comme ces systèmes auxiliaires seront utilisés assez peu dans l'année, on peut se contenter d'installations classiques à faible coût, une chaudière à mazout ordinaire ou une tourelle de refroidissement, selon le cas.

Finalement, la faisabilité financière d'un projet de géothermie dépendra des critères d'évaluation financière du client. Quelquefois, il sera impossible d'obtenir un temps de retour simple inférieur à quelques années. En revanche, certains propriétaires accepteront de tenir compte des frais d'exploitation de leur bâtiment et analyseront un tel projet sur ses coûts globaux avec des durées de vie supérieures à 20 ans.

ACÉTATE 10 : **Systèmes de bâtiments résidentiels**
Exemples : Australie, Allemagne et Suisse

Ces 3 photos illustrent des projets résidentiels bénéficiant de la géothermie, allant d'une maison individuelle en Suisse à un immeuble de 320 appartements en Australie à Adélaïde. Ces deux projets utilisent des échangeurs à puits verticaux. L'autre projet, en Allemagne, bénéficie d'une source d'eau souterraine. Ces projets concernent généralement des constructions haut de gamme et le surcoût d'une installation géothermique ne représente qu'une faible proportion du coût total du bâtiment. Les propriétaires considèrent ce surcoût comme un investissement à long terme, et sont convaincus des avantages de ces installations pour l'environnement, le confort et la qualité de l'air.



Acétate 10

ACÉTATE 10 : **Systèmes de bâtiments résidentiels**
Exemples : Australie, Allemagne et Suisse (suite)

Il existe souvent des programmes de subvention de la part des compagnies d'électricité qui veulent encourager l'utilisation de la géothermie de surface car cela leur permet d'augmenter leurs ventes d'énergie électrique en augmentant moins en proportion la demande en période de pointe. Des considérations environnementales peuvent aussi justifier que les consommateurs reçoivent un aide à l'investissement dans une installation dont la société en général peut retirer un bénéfice. L'existence d'une subvention est souvent déterminante lorsqu'un consommateur doit faire son choix d'une pompe à chaleur géothermique.

ACÉTATE 11 : **Systèmes de bâtiments commerciaux**
Exemples : Royaume-Uni et États-Unis

La viabilité des systèmes géothermiques dans le secteur commercial est souvent pénalisée par l'exigence de courtes périodes de retour simple sur investissement, généralement moins de 5 ans, et par le manque de terrain disponible pour enfouir l'échangeur. Il y a cependant plusieurs réalisations comme ces trois exemples où les pompes à chaleur géothermiques ont été appréciées pour leur compacité, encore amplifiée par leur utilisation sur une boucle d'eau mitigée qui alimente plusieurs zones du bâtiment, ce qui facilite la gestion du confort de ces zones, et élimine les volumineux conduits d'air. On peut également supprimer le besoin de chaufferie. L'option de la géothermie libère donc de l'espace dans le bâtiment et en simplifie l'entretien. En effet, il n'y a plus besoin d'utiliser des tourelles de refroidissement ni des unités de toit exposées au vandalisme et aux intempéries. Avec leur rendement plus élevé, les pompes à chaleur réduisent également les appels de puissance en période de pointe.

La photo du haut montre l'édifice Axa Sunlife situé à Croydon, en Angleterre. Il s'agit du premier grand bâtiment commercial à avoir utilisé en Angleterre, la géothermie avec un échangeur à boucle fermée pour répondre à des besoins de chauffage et de climatisation. Ce bâtiment a remporté un prix d'excellence en environnement du British Engineering Council.

Le quartier d'affaires de Louisville au Kentucky, aux USA, que l'on voit sur la photo de gauche, comprend des immeubles à bureau et un grand hôtel raccordés au plus gros système de géothermie de surface au monde. Ce système comprend 1 200 pompes à chaleur, ayant une capacité totale de réfrigération de 16 MW (4 500 tonnes de réfrigération). Le système utilise une nappe d'eau souterraine et un stockage thermique d'eau.

La dernière photo, en bas à droite, montre la station essence de Prairie Village au Kansas, aux États-Unis. Un système géothermique est utilisé pour faire fondre la neige sur les aires asphaltées, produire de l'eau chaude pour le lave-auto, de l'air chaud pour le séchage du lave-auto mais aussi le froid des comptoirs réfrigérés, de la chambre froide à bière et des machines à glaçons. Ce système a été remboursé en moins de 2 ans par rapport à une installation classique.



Acétate 11

ACÉTATE 12 : Systèmes de bâtiments publics
Exemples : Canada et États-Unis

Les pompes à chaleur géothermique se prêtent bien aux bâtiments publics car souvent le propriétaire est en même temps l'occupant et l'exploitant du bâtiment, ce qui l'amène à accepter de plus longs temps de retours sur investissement que dans le secteur commercial. Il y a donc plus d'occasions d'implanter des technologies d'avant-garde ou à hautes performances comme la géothermie. De plus, dans ce genre de bâtiments, il y a souvent à la fois des besoins de chauffage et de climatisation, une situation avantageuse pour un système géothermique. Un bel exemple est celui des patinoires où il y a, en plus des besoins de froid pour la fabrication de la glace, des besoins de chauffage et d'eau chaude, incluant ceux de la machine à resurfacier la glace.

Sur la photo, nous voyons l'École Professionnelle de St-Hyacinthe au Québec, près de Montréal. Ce bâtiment est situé au milieu de terres agricoles et il a été très facile d'enfouir à bas coût une tuyauterie horizontale avec la même machinerie utilisée pour installer des drains agricoles. Ce bâtiment comprend aussi un mur de préchauffage solaire d'air de ventilation.



Acétate 12

ACÉTATE 13 : Modèle RETScreen® pour les projets de pompes à chaleur géothermique

Bien que simple, ce modèle est un outil très pratique dans le cadre d'une analyse préliminaire de faisabilité technique et financière d'implanter un système de pompe à chaleur géothermique. Où qu'elle soit réalisée dans le monde, une installation géothermique peut être analysée au niveau de l'énergie produite, des coûts globaux sur la durée de vie, et des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Le modèle s'applique aussi bien aux bâtiments publics ou commerciaux, qu'aux maisons individuelles ou aux bâtiments industriels. Il s'adresse autant à des installations utilisant des eaux souterraines en boucle ouverte qu'un échangeur en boucle fermée enfoui horizontalement dans le sol ou inséré dans des forages verticaux. Les données que doit fournir l'utilisateur sont simplifiées au maximum.

Même s'il s'applique à la plupart des installations géothermiques, le modèle RETScreen® a certaines limites. D'abord, il n'a pas été conçu pour les projets utilisant des eaux de surface. Il ne tient pas non plus compte du déséquilibre énergétique à long terme qui pourrait avoir un impact sur la température du sol lorsque les charges de climatisation et de chauffage sont très différentes. Le modèle ne tient pas non plus compte des bâtiments ou des zones peuvent avoir des besoins de climatisation alors que d'autres peuvent avoir des besoins de chauffage; le modèle simplifié traite un bâtiment comme un seul bloc ayant des besoins moyens. Enfin, le modèle ne permet pas d'ajouter une charge de production d'eau chaude sanitaire à la pompe à chaleur.



Acétate 13

ACÉTATE 14 : Calculs RETScreen® : pompes à chaleur géothermique

Le modèle RETScreen permet de calculer le bilan énergétique d'un système de pompe à chaleur géothermique sur une année complète d'utilisation. Ce bilan n'est pas calculé pour chacune des 8 760 h de l'année mais plutôt par tranches de température ambiante associées à un certain nombre d'heures dans l'année. On considère que le système est en régime permanent à l'intérieur de chacun des intervalles de température, ce qui signifie que les calculs de rendement se font pour les niveaux de température atteints pour la température ambiante de l'intervalle et ne tiennent pas compte des conditions qui ont pu précéder.



Acétate 14



ACÉTATE 14 : **Calculs RETScreen® : pompes à chaleur géothermique (suite)**

Ce calcul se fait par itérations. Pour plus de précisions, l'utilisateur peut consulter le Manuel d'ingénierie et d'études de cas disponible sans frais sur le site Internet de RETScreen.

L'utilisateur de RETScreen devra entrer des données décrivant les caractéristiques du sol, les températures maximales et minimales annuelles de l'endroit et le type de pompe à chaleur et d'échange de chaleur avec le sol. Pour que RETScreen puisse évaluer les puissances et les quantités d'énergie nécessaires au bâtiment, l'utilisateur devra également fournir au modèle quelques caractéristiques de celui-ci. Il peut également entrer directement les valeurs des puissances thermiques maximales et des quantités annuelles d'énergie thermique requises en chauffage et en climatisation par le bâtiment.

RETScreen utilise les températures de calcul en chauffage et en climatisation, deux valeurs également fournies par l'utilisateur, pour déterminer la largeur des intervalles de température ambiante qui seront utilisés, le nombre d'intervalles de calcul du modèle entre -50° et $+50^{\circ}$ °C, et le nombre d'heures dans l'année qui se situe dans chacun de ces intervalles. Le modèle utilise également d'autres données fournies par l'utilisateur pour calculer les températures minimales et maximales atteintes par le sol à la profondeur où est enfoui l'échangeur: il s'agit de la température moyenne du sol en surface et de l'amplitude annuelle de sa variation.

Si l'utilisateur a décrit le bâtiment par ses caractéristiques architecturales, RETScreen calcule les charges de chauffage et de climatisation en fonction de la température extérieure, en utilisant une équation qui tient compte, de manière empirique, des transferts thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment, des gains solaires, des gains internes, des besoins de déshumidification ou d'humidification des apports d'air neuf déterminés en fonction du nombre d'occupants du bâtiment.

Si en revanche, l'utilisateur a directement fourni les données thermiques annuelles de consommation et les charges de pointe en climatisation et en chauffage du bâtiment, le modèle a besoin de savoir comment répartir ses besoins annuels dans chaque intervalle de température. RETScreen utilisera un processus itératif pour déterminer quelle équation reproduit le mieux les charges de pointe aux températures de calcul, pour pouvoir ensuite appliquer cette équation à chacun des intervalles de température du modèle. Cette équation permet d'évaluer, à l'intérieur de chaque intervalle de température, la consommation et les puissances thermiques en jeu, ce qui permettra d'une part de dimensionner la pompe à chaleur géothermique, et d'autre part d'évaluer la consommation électrique. Le modèle détermine également les températures d'équilibre du bâtiment, c'est-à-dire les températures ambiantes entre lesquelles le bâtiment n'a besoin ni de chauffage ni de climatisation.

Le modèle RETScreen calcule ensuite la capacité frigorifique de la pompe à chaleur qui sera nécessaire pour combler les besoins du bâtiment en réfrigération à la température de conception en climatisation. Cette capacité pourra être plus importante si l'utilisateur a choisi de dimensionner le système en utilisant le chauffage comme critère de conception et que pour combler les besoins de chauffage, il faut une machine plus puissante que pour combler les besoins de climatisation.

La capacité frigorifique évaluée par RETScreen dépendra de la température atteinte par le fluide circulant dans l'échangeur en contact avec le sol. Le modèle prend comme hypothèse que la demande de pointe en climatisation doit être assurée lorsque le fluide thermique a la température la plus élevée et que la demande de pointe en chauffage doit être assurée lorsqu'il a sa température la plus basse. La capacité donnée par le modèle est celle de la pompe à chaleur aux conditions spécifiées pour leur essai de certification.

ACÉTATE 14 : **Calculs RETScreen® : pompes à chaleur géothermique (suite)**

RETScreen calcule ensuite les dimensions que devra avoir l'échangeur à enfouir dans le sol, ou le débit d'eau souterraine qu'il faudra soutirer, pour que la pompe à chaleur puisse fonctionner avec les performances prévues. Pour obtenir la longueur nécessaire de tuyauterie à enfouir, le modèle utilise les températures de calcul en chauffage et en climatisation, le coefficient de performance de la pompe à chaleur, les caractéristiques du sol et la différence de température entre le sol et le fluide à sa sortie de l'échangeur géothermique, c'est-à-dire à son entrée dans la pompe à chaleur. Pour les systèmes à boucle ouverte, le débit d'eau souterraine nécessaire est calculé comme celui qui est suffisant pour combler les besoins de la pompe à chaleur à la température de conception de chauffage ou de climatisation selon lequel de ces deux besoins est le plus important.

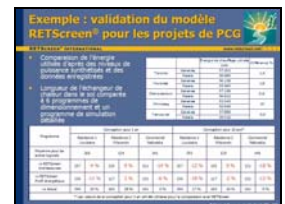
Pour chaque intervalle de température, RETScreen calcule le rendement effectif de la pompe à chaleur. On commence donc par calculer le coefficient de performance (COP) et la capacité frigorifique de celle-ci à la température du fluide fourni par le sol à la pompe à chaleur, pour cet intervalle de température. Ensuite, à partir de la charge thermique associée à chaque intervalle, on évalue la fraction de temps que la pompe à chaleur fonctionnera à sa capacité pour cet intervalle. Avec un facteur d'ajustement qui tient compte des pertes de rendement à chaque démarrage de la pompe, on en déduit donc la consommation d'électricité de la pompe à chaleur. On y ajoute ensuite la consommation des pompes de circulation de la boucle de fluide circulant dans le sol et de celle du fluide circulant dans le bâtiment.

Si l'utilisateur a décidé de dimensionner l'échangeur dans le sol selon le critère de climatisation ou de chauffage alors que celui-ci ne correspond pas à la charge la plus exigeante des deux, il y aura besoin d'ajouter à la boucle géothermique une capacité additionnelle de chauffage ou d'évacuation de chaleur selon le cas. Cet équipement additionnel sera considéré avoir les mêmes spécifications que celui qui aurait été choisi pour le système mécanique de référence auquel on compare le système géothermique. Sa consommation d'électricité sera alors calculée pour chaque intervalle de température et ajoutée à la consommation globale du système géothermique.

ACÉTATE 15 : **Exemple : validation du modèle RETScreen® pour les projets de PCG**

Le modèle RETScreen, pour des installations géothermiques, a été validé de plusieurs manières. Par exemple, on a comparé les puissances et les quantités d'énergie mises en jeu à chaque intervalle de température, telles que calculées par RETScreen, aux données résultant des mesures de suivi des performances de systèmes réels. Quand on compare le bilan annuel de ces résultats pour des pompes à chaleur typiques sur air extérieur utilisé dans les climats de 5 villes différentes du Canada, on constate que le modèle RETScreen respecte à 3% près les valeurs mesurées.

Une autre validation du modèle RETScreen a porté sur le calcul de la longueur nécessaire d'échangeur de chaleur. On a comparé les résultats de RETScreen à ceux d'un programme d'analyse détaillée avec simulation horaire et à d'autres programmes de dimensionnement d'échangeur. Les cas soumis à la comparaison sont des projets situés aux USA, 2 projets résidentiels et 1 projet commercial. La comparaison a été répétée deux fois, l'une à partir des données directes des charges de climatisation et de chauffage; l'autre à partir des valeurs proposées par RETScreen à qui on fournit les caractéristiques architecturales du bâtiment.



Acétate 15

ACÉTATE 15 : **Exemple : validation du modèle RETScreen® pour les projets de PCG (suite)**

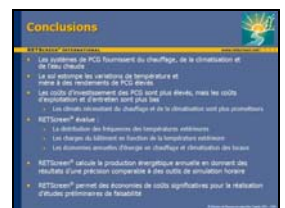
Dans tous les cas, les longueurs d'échangeur prescrites par RETScreen s'inscrivent dans une plage de 20% autour de la valeur moyenne donnée par les autres modèles auxquels on a comparé RETScreen. Cette comparaison s'applique aussi bien aux modèles utilisant une simulation sur une année seulement, qu'aux modèles évaluant aussi les possibles variations du bilan thermique sur des périodes aussi prolongées que 10 ans. Cependant, les longueurs qui ont été effectivement installées dans des projets réels sont souvent nettement différentes de celles suggérées par des logiciels de dimensionnement. Cela indique que RETScreen est plus précis que les décisions des installateurs de systèmes géothermiques, reposant probablement sur des règles empiriques. C'est une indication supplémentaire que RETScreen offre une précision suffisante pour la réalisation d'études préliminaires de faisabilité.

ACÉTATE 16 : **Conclusions**

Les systèmes de pompes à chaleur géothermique ont fait la preuve de leur fiabilité et de leur rentabilité dans un grand nombre de projets où ils comblent des besoins de chauffage, de climatisation et de production d'eau chaude sanitaire. Grâce à l'inertie thermique du sol, ces systèmes bénéficient d'une source d'énergie à température stable en comparaison des variations saisonnières de la température ambiante, ce qui leur permet d'avoir des rendements énergétiques élevés. De telles installations reviennent plus cher lors de l'investissement initial que des installations classiques de chauffage et de climatisation mais leurs frais d'exploitation et d'entretien sont ensuite beaucoup plus faibles. On obtient une meilleure rentabilité financière avec ces installations lorsqu'il existe des besoins de climatisation autant que de chauffage, ce qui permet de bénéficier de leur meilleur rendement sur une plus longue période au cours d'une année.

Le modèle RETScreen établit une courbe de répartition des températures ambiantes au cours d'une année à partir des seules données des températures de calcul en chauffage et en climatisation. En regroupant les fréquences de distribution par intervalles de température, on peut utiliser un modèle qui permet de calculer la charge énergétique du bâtiment en fonction de la température extérieure, puis d'évaluer les économies d'énergie d'une telle installation géothermique par rapport à un système classique de chauffage et de climatisation.

RETScreen permet également de dimensionner la capacité frigorifique nécessaire de la pompe à chaleur, la longueur de l'échangeur de chaleur à enfouir dans le sol ou le débit nécessaire d'eau souterraine que l'on doit en extraire. On obtient cela uniquement à partir de quelques données caractéristiques du climat et du sol à l'endroit du projet et RETScreen offre cependant une précision comparable aux logiciels de dimensionnement ou de simulation horaire qui existent déjà. Par conséquent, l'utilisation de RETScreen permet de réduire le temps et le coût de réalisation d'études préliminaires de faisabilité d'implanter un projet de pompe à chaleur géothermique.



Acétate 16

ACÉTATE 17 : **Questions?**

Voici la fin du module de formation *Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique* du cours d'analyse de projets d'énergies propres de RETScreen International.



Acétate 17