

## 13. Énergie géothermique

### *13.3 – Géothermie à basse énergie – systèmes aérauliques*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Groupe t3e, Département de génie mécanique*

Patrick Belzile, ing., M.ing.

Louis Lamarche, ing. M.Sc.A, Ph.D.

Pierre-Luc Paradis, B.Ing, M.Ing, Ph.D.

Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.

Mathieu Patin, M.ing.

# Plan de la présentation

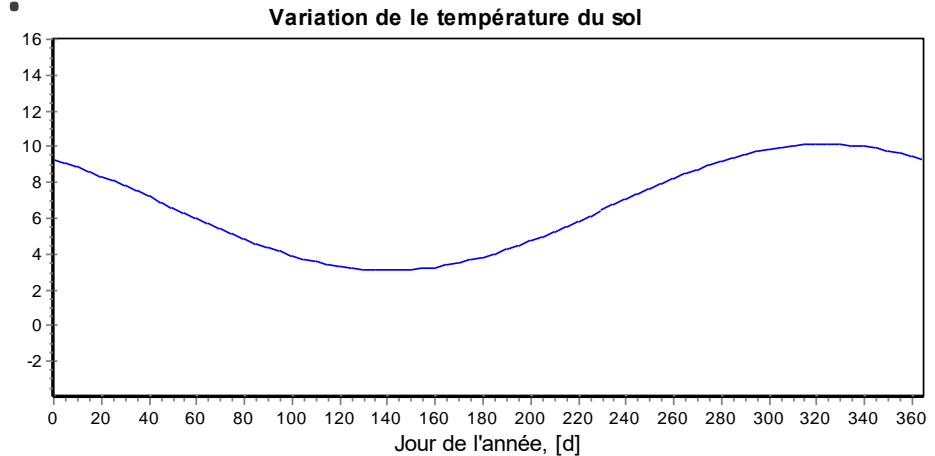
- Introduction et objectifs de la capsule
- Échangeur sol-air
- Exemples de projets
- Conclusion

# Plan de la présentation

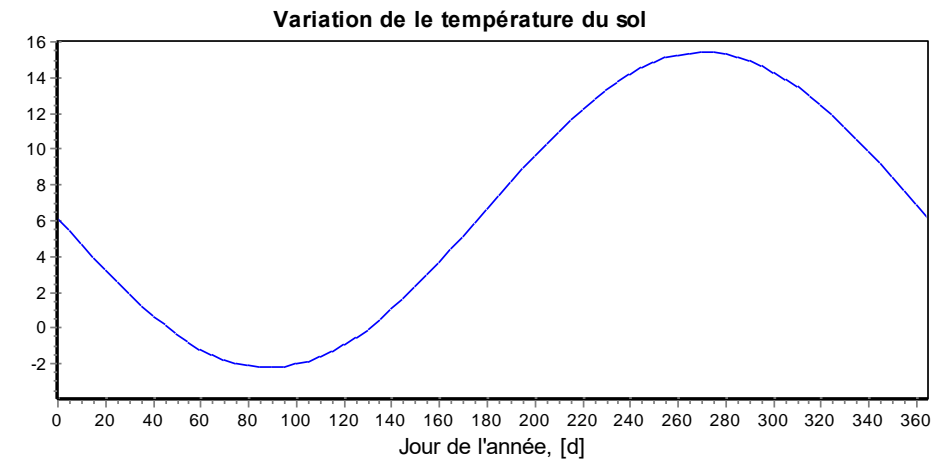
- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Échangeur sol-air
- Exemples de projets
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Le sol au Québec est à environ :
  - 2-12°C à 2m de profondeur



- -2°C-16°C à 1m de profondeur



# Introduction et objectifs

- Avec un sol à près 7°C en moyenne:
  - Il est facile de préchauffer de l'air à -22°C
  - Il est facile de rafraichir de l'air à 32°C

$$q = \dot{m} c_p \Delta T$$

# Introduction et objectifs

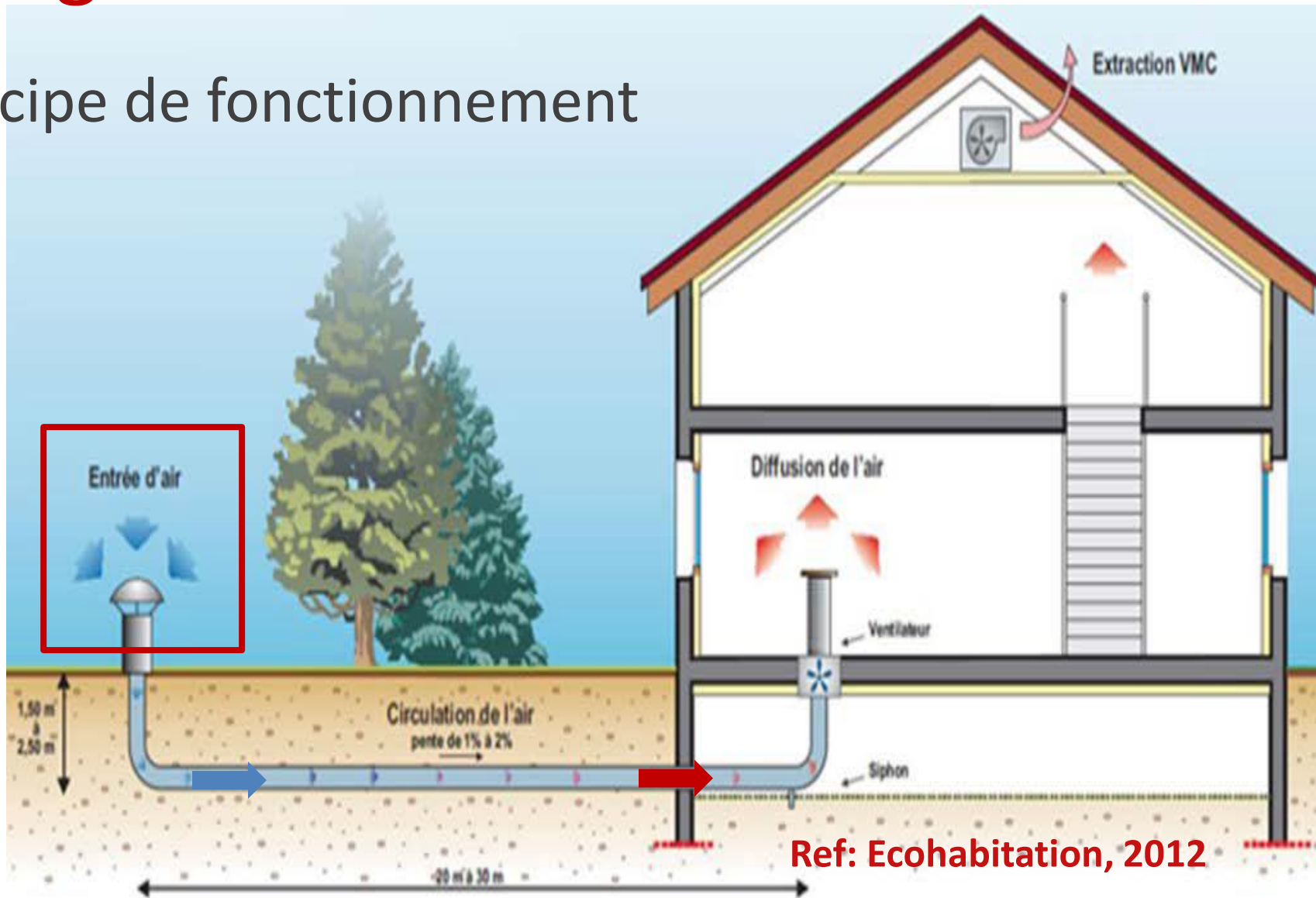
- Objectifs
  - Présenter l'échangeur air-sol
  - Discuter quelques paramètres de conception
  - Proposer des exemples de projets

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Échangeur sol-air***
- Conception
- Exemples de projets
- Conclusion

# Échangeur sol-air

- Principe de fonctionnement

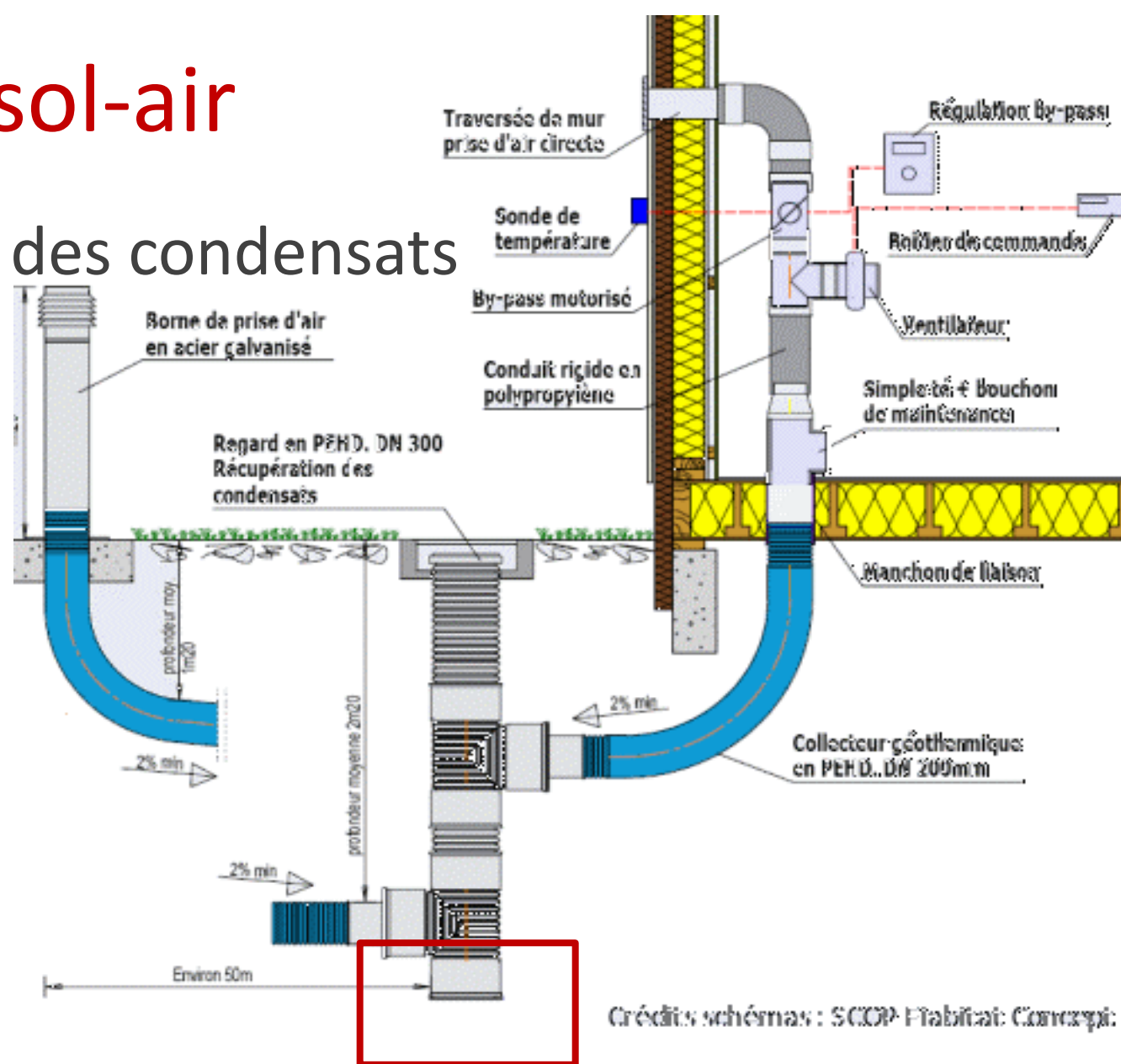


Ref: Ecohabitation, 2012



# Échangeur sol-air

- Récupération des condensats

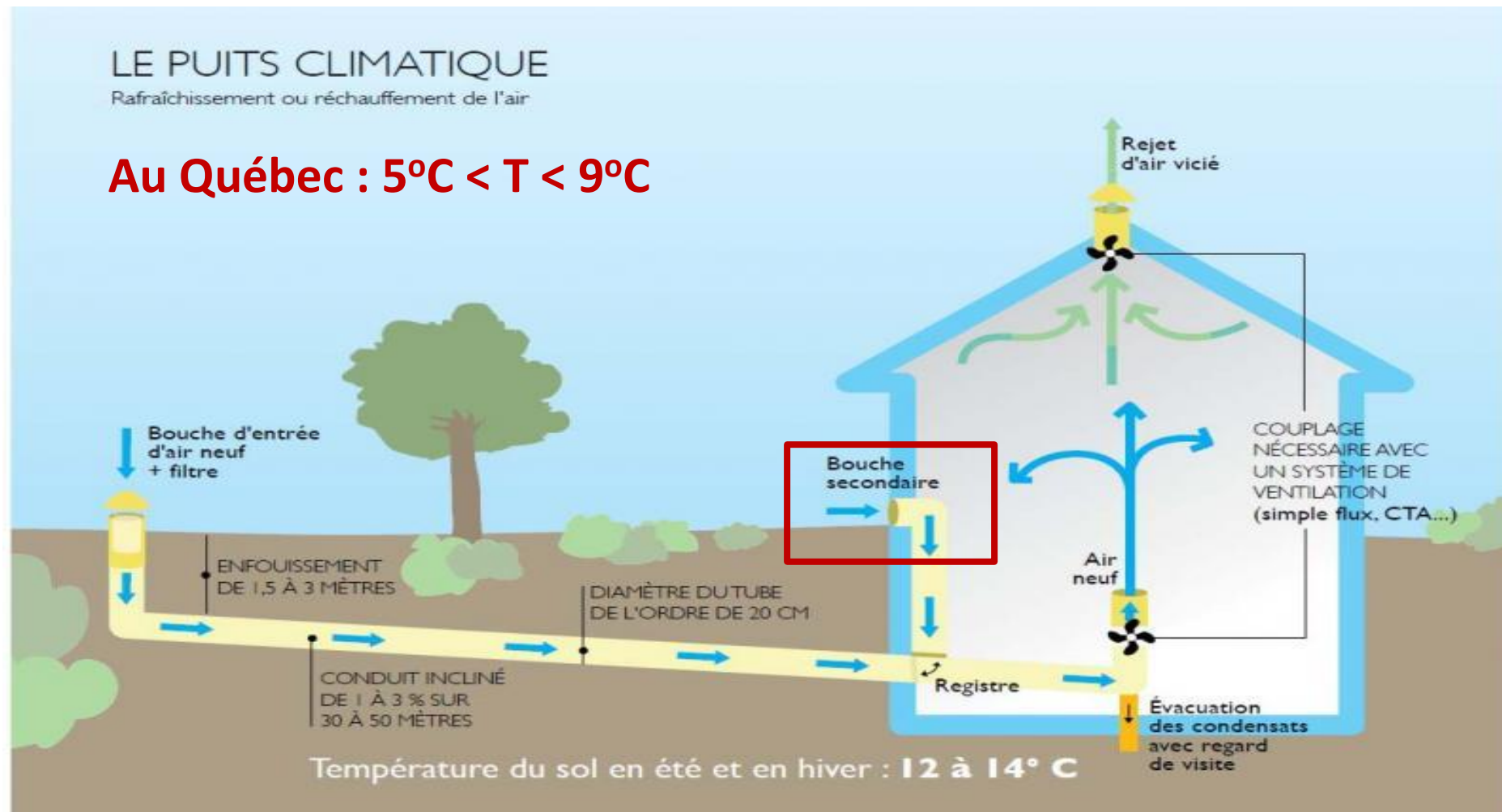


Ref: <http://www.fiabitat.com/dimensionner-un-puits-canadien/>

# Échangeur sol-air

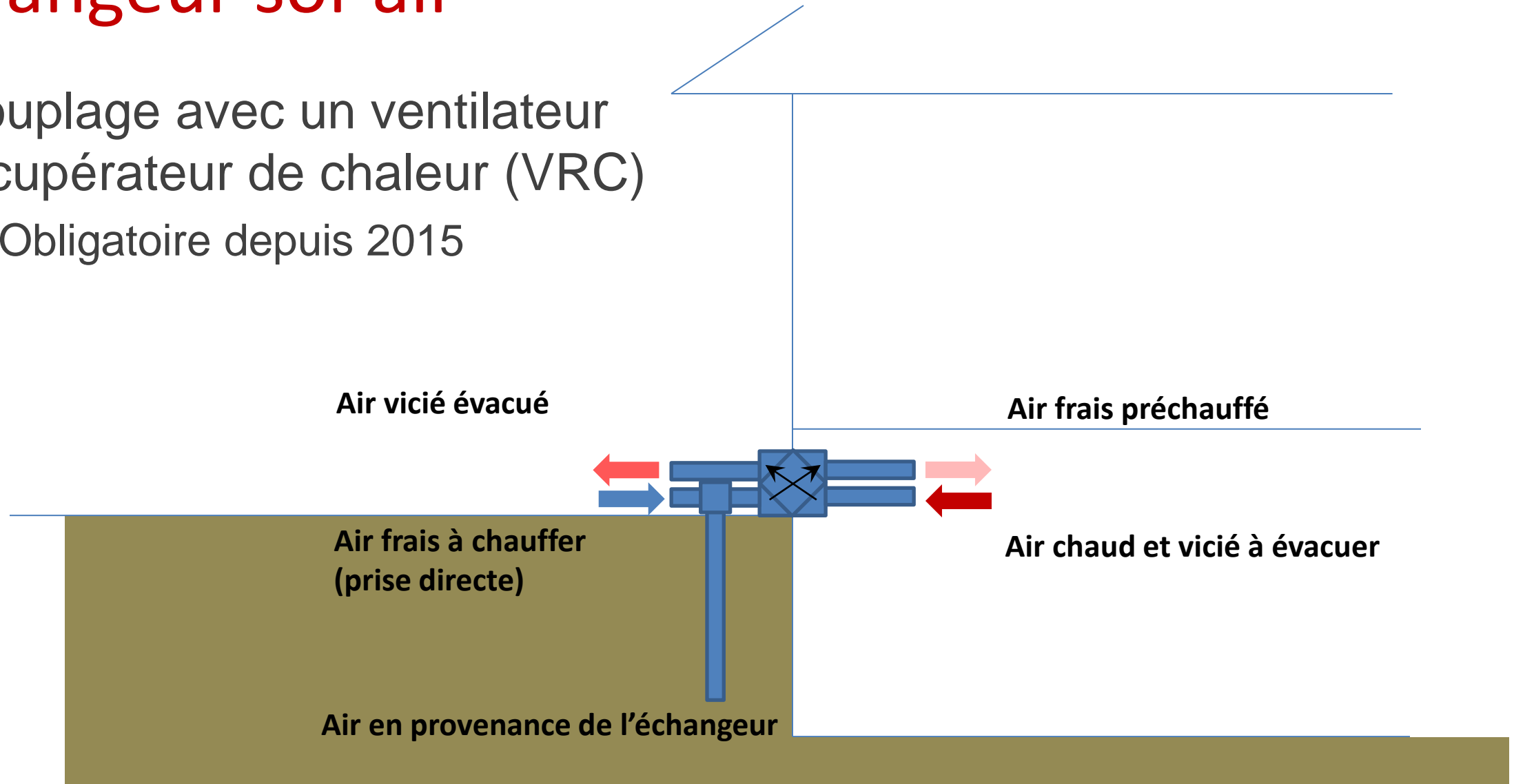
- Prise d'air auxiliaire

Ref: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (2012).  
Les Fiches Techniques de l'ADEME : Puits climatiques



# Échangeur sol-air

- Couplage avec un ventilateur récupérateur de chaleur (VRC)
  - Obligatoire depuis 2015



# Échangeur sol-air

- Installation



Ref: <http://www.fiabitat.com/dimensionner-un-puits-canadien/>



# Échangeur sol-air

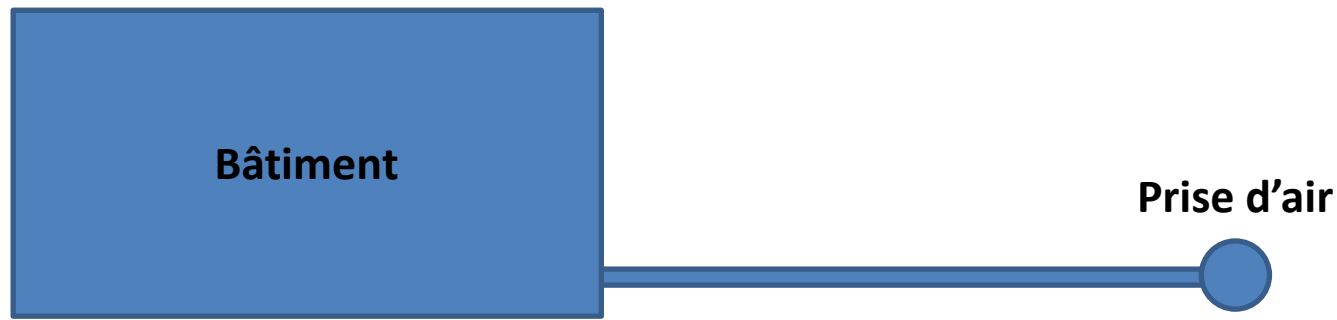
- Les coûts d'excavation peuvent dépasser 50% des coûts totaux;
- Donc, la PRI peut plus que doubler en raison de l'excavation.



**Ref: Patin, M., (2020) Mémoire de maitrise, 30 crédits, ÉTS**

# Échangeur sol-air

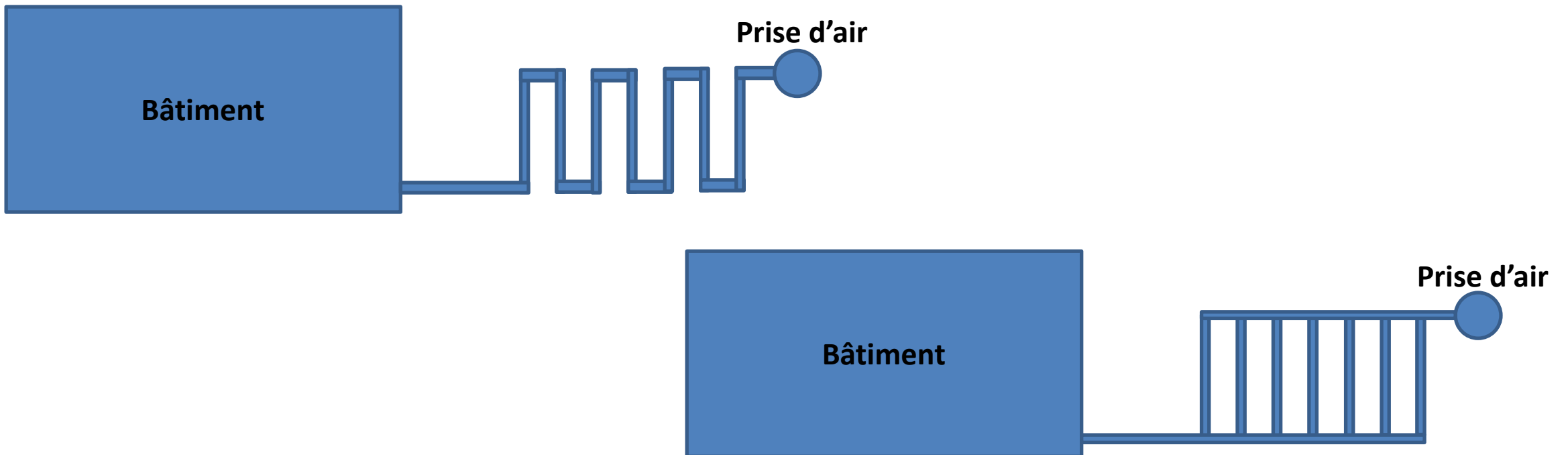
- Configuration pour le champ souterrain
  - Directe ou tranchée classique



**Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS**

# Échangeur sol-air

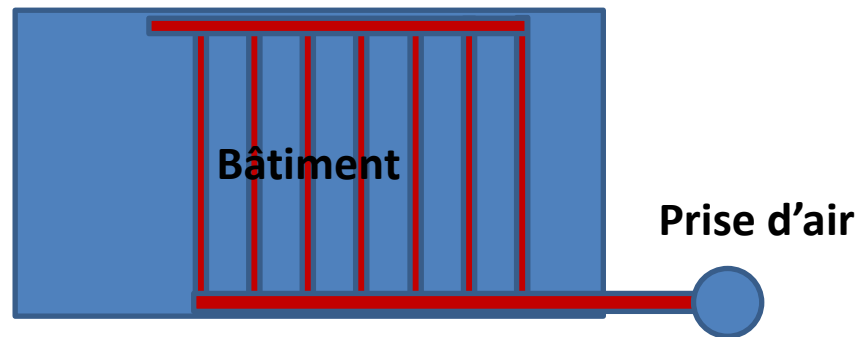
- Configuration pour le champ souterrain
  - En serpentín en série (haut) et en parallèle (bas)



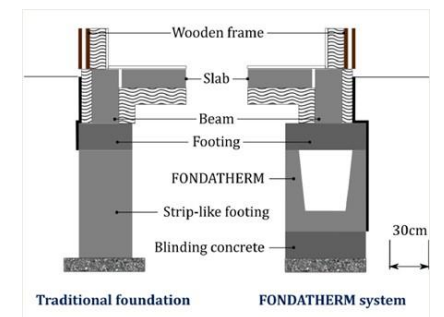
Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS

# Échangeur sol-air

- Configuration pour le champ souterrain
  - Sous la fondation



Dans la fondation

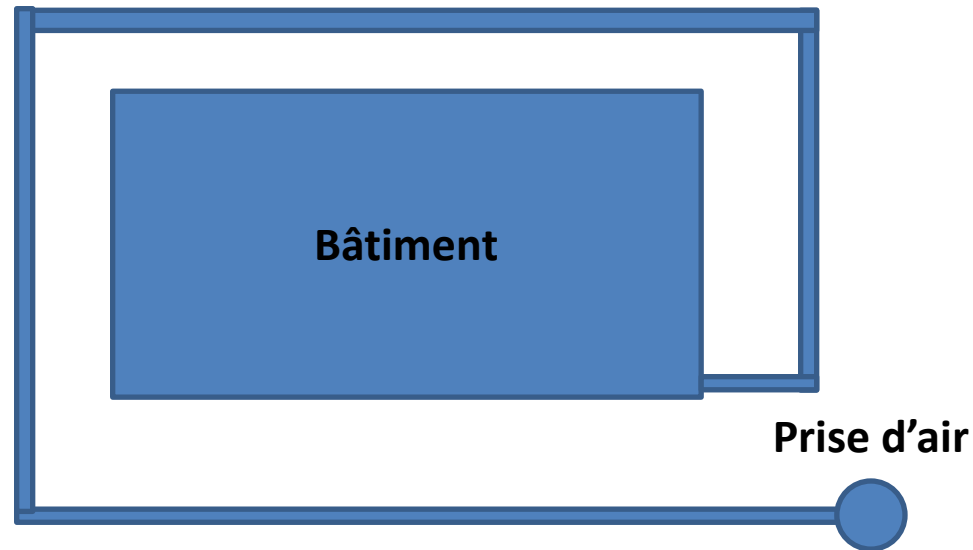


Ref: Patin, M., (2020) Mémoire de maitrise, 30 crédits, ÉTS



# Échangeur sol-air

- Configuration pour le champ souterrain
  - Autour de la fondation (limite les coûts d'excavation)



**Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS**

# Échangeur sol-air

- Conduits

- Tel que mentionné, le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube en ligne droite ou en boucle autour du bâtiment ou encore en réseau de tubes parallèles entre deux collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits (boucle de Tichelmann).
- Afin de minimiser les pertes de charge et de faciliter l'entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes.
- Bien qu'on puisse réaliser un puits en tuyaux de béton, de fonte ou de plastique, les matériaux lisses sont préférables afin d'éliminer les condensats plus facilement.

# Échangeur sol-air

- Conductivité
  - L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit théoriquement être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits.
  - Cependant, des simulations ont montré que le HDPE comparé à l'acier pour une installation résidentielle ne changeait les résultats que de moins de 3 %
  - Les matériaux utilisés doivent également avoir une excellente résistance à l'écrasement.

# Échangeur sol-air

- Longueur
  - La longueur de l'échangeur est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge;
  - Elle est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation.

# Échangeur sol-air

- Diamètre

- En fonction du débit d'air requis, le diamètre du conduit est alors calculé pour respecter les conditions de vitesse d'écoulement.
- Pour optimiser les transferts thermiques, la vitesse de l'air dans le conduit doit être comprise entre 1 et 3 m/s.
- On choisit d'ajouter un ventilateur à un échangeur lorsque connecté à un VRC pour des installations de grande taille.

# Échangeur sol-air

- Diamètre
  - Plus le diamètre est faible :
    - moins coûte l'échangeur
    - plus efficace est l'échangeur
    - mais plus grandes sont les pertes de charge
  - Pour de petites installations, on choisit le diamètre afin de ne pas avoir à ajouter un ventilateur supplémentaire pour lutter contre les pertes de charges;
  - Dans plusieurs cas 25 cm ou 10po. est un diamètre adéquat.

# Échangeur sol-air

- Espacement
  - Dans les configurations à plusieurs tubes, l'espacement devrait être supérieur à 5 fois le diamètre des tubes afin de garantir :
    - un bon échange thermique de chaque tube;
    - un court-circuitage minimal;
    - et une recharge suffisante du sol.

# Échangeur sol-air

- Pente
  - La pente du conduit doit être comprise entre 1 et 3 % pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud entre en contact avec les parois plus froides du puits;



# Échangeur sol-air

- Condensat

- S'il n'est pas possible d'éviter la condensation (lors des applications de climatisation ou de rafraîchissement), il faut prévoir une évacuation adéquate des condensats.

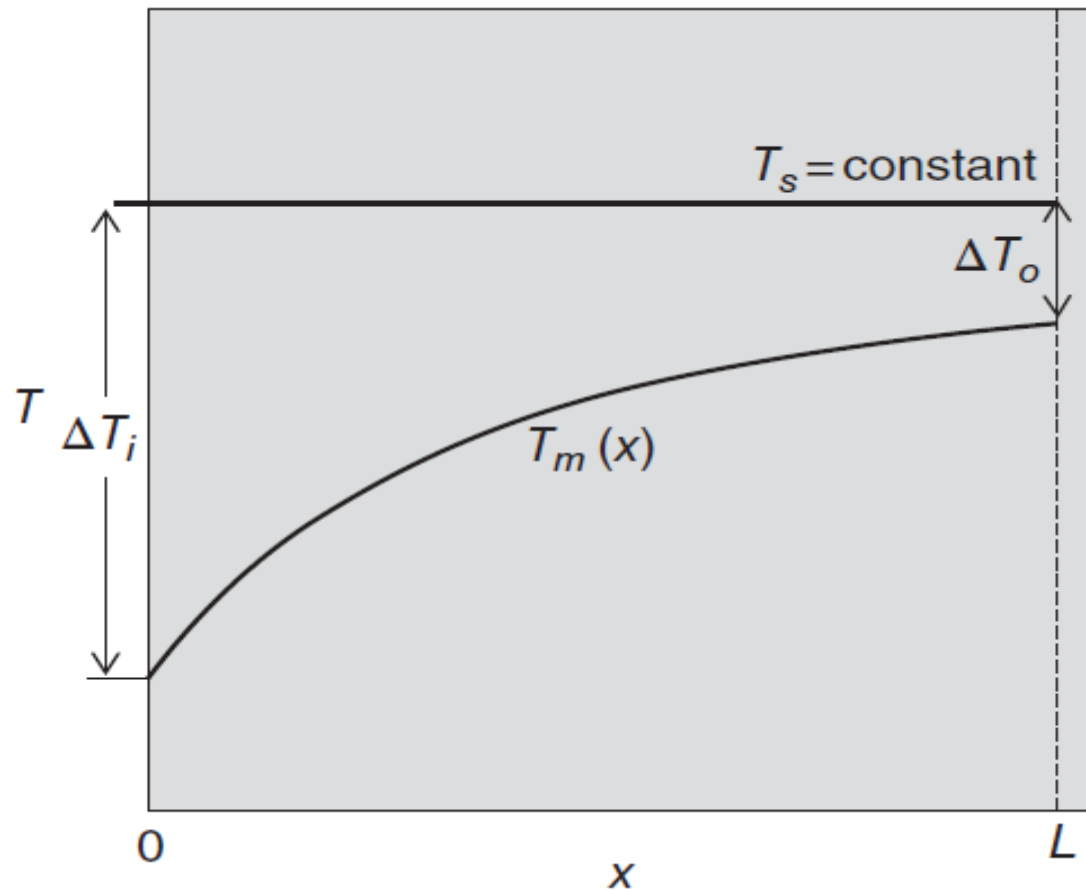
- Lorsque le bâtiment est pourvu d'un sous-sol, l'évacuation du condensat à l'intérieur, à partir du point le plus bas, est classique, c'est-à-dire par un siphon raccordé indirectement à un avaloir;
    - S'il n'y a pas de sous-sol, un regard de visite doit être placé à l'endroit le plus bas du puits (sous la bouche d'entrée d'air si le conduit est montant, à l'extrémité du conduit côté bâtiment si celui-ci est descendant) afin d'évacuer les condensats par infiltration dans le sol à l'aide d'un lit de cailloux.

# Échangeur sol-air

- Étanchéité et salubrité
  - L'étanchéité du réseau (tubes et raccords) est indispensable pour empêcher la pénétration de racines ainsi que l'infiltration d'eau et de radon à l'intérieur du conduit.
  - Des tubes peuvent avoir subi un traitement antimicrobien (ex.: au sel d'argent) pour que l'air neuf ne devienne pas une cause de dégradation de la qualité de l'air intérieur. Mais cela devient rapidement très cher et n'est pas durable.

# Échangeur sol-air

- Une analyse simple ( $T_s = \text{constante}$ )

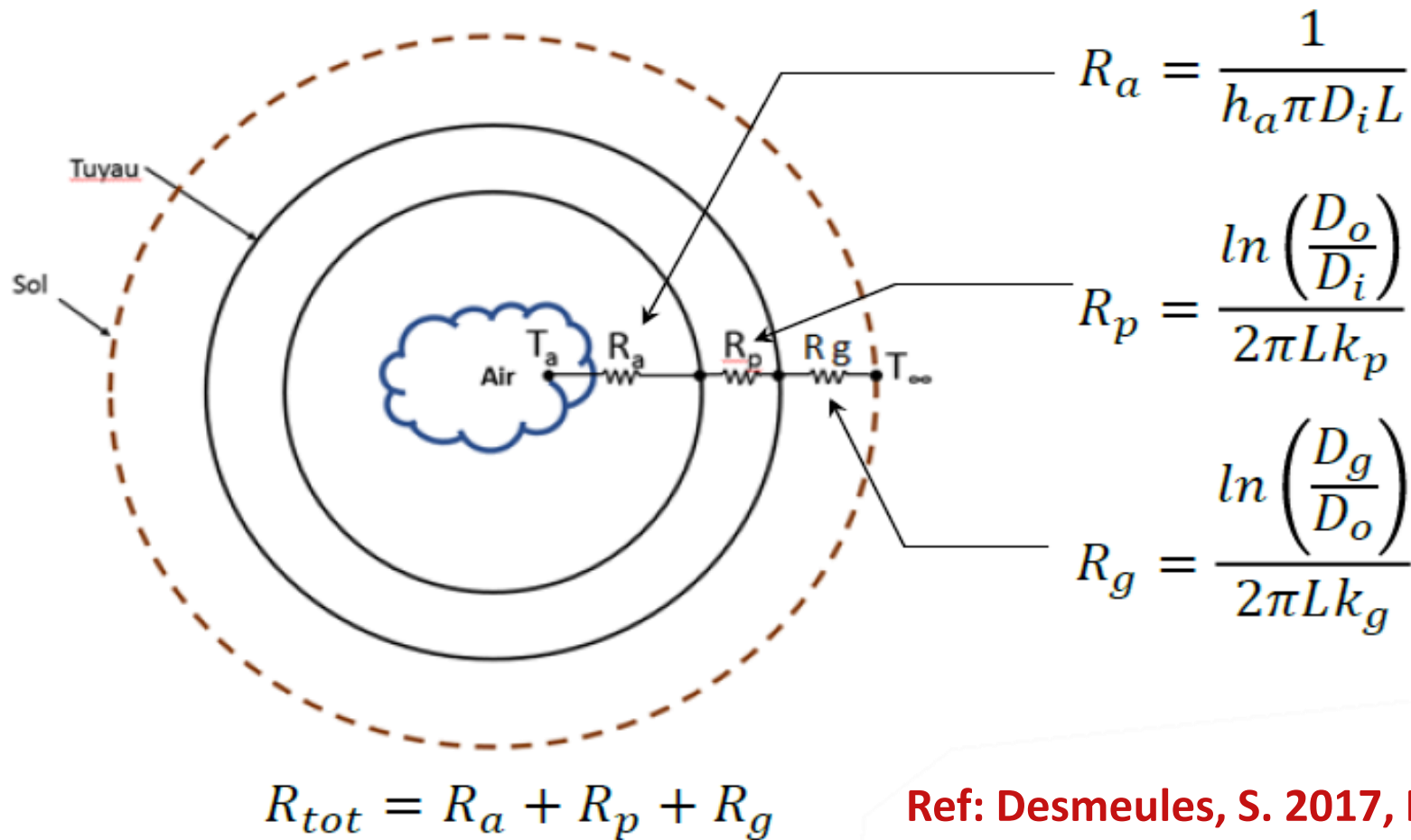


$$\frac{\Delta T_{a,o}}{\Delta T_{a,i}} = \frac{T_s - T_{a,o}}{T_s - T_{a,i}} = e \left[ -\frac{1}{\dot{m}_a c_{p,a} R_{tot}} \right]$$

Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS

# Échangeur sol-air

- Une analyse simple



Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS

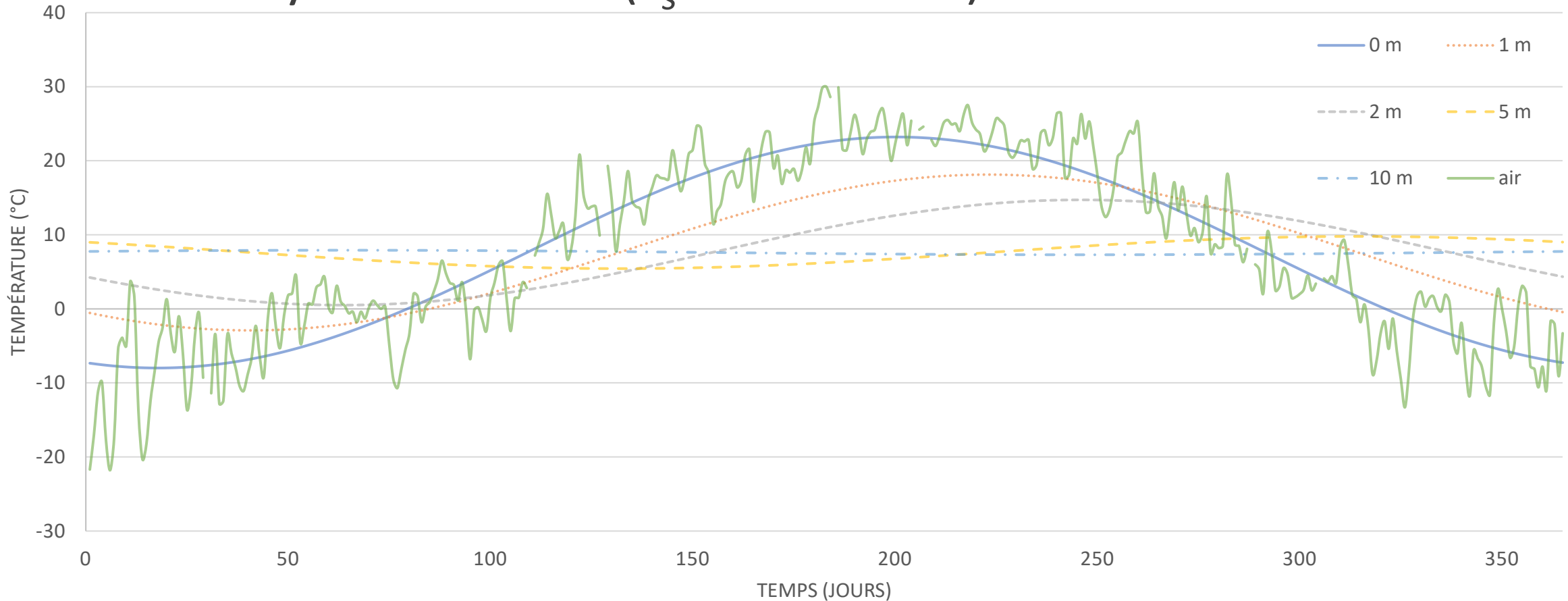
# Échangeur sol-air

- Une analyse améliorée
  - Hollmuler et al.(2013) proposent un modèle équivalent, mais amélioré pour le dimensionnement d'un puits canadien;
  - Ce modèle analytique se base sur une impulsion temporaire, et permet d'évaluer la zone du sol impactée par le puits;
  - Pas à l'étude dans ce cours.

**Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS**

# Échangeur sol-air

- Une analyse améliorée ( $T_s \neq \text{constante}$ )



**Ref: Desmeules, S. 2017, Rapport de projet, 15 crédits, ÉTS**

# Échangeur sol-air

- Application résidentielle au Québec (bâtiment type)
  - 291 m<sup>2</sup> de surface
  - 170 m<sup>2</sup> de mur
  - 44 m<sup>2</sup> de fenêtre
  - 77 m<sup>2</sup> de toiture
  - 67 m<sup>2</sup> au sol



# Échangeur sol-air

- Application résidentielle au Québec

- Résultats

- Les pertes par court-circuitage (entre les murs de fondation et l'échangeur) et de couplage (entre l'échangeur et le VRC) sont 50% et plus de toute la chaleur récupérée par l'échangeur lorsque couplé au VRC.
    - Une configuration à plusieurs tubes n'est pas à favoriser si la place autour des fondations ne permet pas de les espacer suffisamment les uns des autres.
    - Un tube de petit diamètre donne de meilleurs résultats mais une attention particulière aux pertes de charge dans les tubes doit être portée pour ne pas ajouter un ventilateur supplémentaire à l'installation.
    - L'échangeur doit être placé le plus profond et le plus loin possible des fondations tant qu'une excavation supplémentaire n'est pas nécessaire.



# Échangeur sol-air

- Étude de cas
  - Dans ce problème, un échangeur sol-air est considéré pour préchauffer l'air frais d'une VRC.
  - Le sol est considéré à température constante de  $7^{\circ}\text{C}$  pendant toute la période de chauffage.
  - Le tube de PVC de longueur  $L = 40\text{ m}$  possède un diamètre intérieur de  $20\text{ cm}$  et une épaisseur de  $3\text{ mm}$ . Le rayon considéré au-delà duquel le sol ne varie pas en température est de  $15\text{ cm}$ .
  - Les conductivités du sol et du PVC sont de  $0,52\text{ W/mK}$  et  $0,35\text{ W/mK}$

# Échangeur sol-air

- Étude de cas
  - On circule 200 CFM d'air.
  - Les températures moyennes mensuelles pour Montréal sont de :
    - January -10,2
    - February -8,4
    - March -2,3
    - November 1,6
    - December -6,3
  - Quel est le gain thermique pendant ces cinq mois?
  - Quelle est la valeur de cette énergie si vous devez entrer en compétition avec un fournisseur:
    - d'électricité à 0,10\$/kWh?
    - de gaz à 0,40\$/m<sup>3</sup>?

# Échangeur sol-air

- Étude de cas
  - Si vous désirez une PRI simple de 10 ans, quel est le budget d'investissement initial maximal possible?
  - Quelle est votre recommandation:
    - On abandonne, ce ne sera jamais rentable
    - On poursuit par une étude de faisabilité en engageant une firme spécialisée
  - Note : vous négligez, en première approximation:
    - les variations de propriétés de l'air,
    - les variations de la température du sol,
    - la consommation du ventilateur (pertes de charge),
    - les frais annuels d'entretien et de maintien d'actifs

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Échangeur sol-air
- ***Exemples de projets***
- Conclusion

# Exemples de projets

- MEC, Montréal



# Exemples de projets

- La Tohu, Montréal

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Échangeur sol-air
- Exemples de projets
- ***Conclusion***

# Conclusions

- L'échangeur sol-air est un dispositif simple mais qui peut être coûteux en raison de :
  - L'excavation requise
  - Le coût des tubes qui augmente avec le carré du diamètre;
- Ce qui détermine la faisabilité sera toujours ultimement une question d'argent... jusqu'à ce que le modèle économique change.



# Références

- Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82, 34-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.011>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650519300045>
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., & Ervina Efzan, M. N. (2016). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 692-713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014689>
- Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec. (2015). L'utilisation d'un VRC. Anjou
- Bansal, V., Misra, R., Agarwal, G. D., & Mathur, J. (2013). 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis. *Applied Energy*, 102, 418-426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.027>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911200549>
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2009). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating. *Energy and Buildings*, 41(11), 1151-1154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.010>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001200>

# Références

- Desmeules, S. (2017). Conception d'un système géothermique horizontal pour le traitement de l'air destiné aux bâtiments agricoles (École de technologie supérieure)
- Hellström (1991), Ground Heat Storage
- Hollmuller, P. (2002). Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique (University of Geneva).
- Hollmuller, P., & Lachal, B. (2014). Air–soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. Applied Energy, 119, 476-487. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.042>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914000610>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (1998). TRNSYS compatible moist air hypocaust model. Repéré à <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:22536>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (2005). Buried pipe systems with sensible and latent heat exchanges: validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring.
- Dinçer et Rosen (2011), Thermal Energy Storage
- Florides et Kalogirou (2007), Ground heat exchangers--A review of systems, models and applications



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

