



# Lawrence Berkeley Laboratory

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

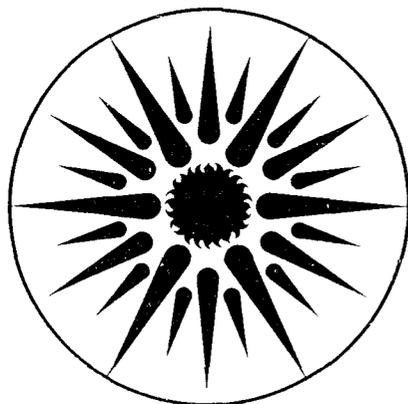
## ENERGY & ENVIRONMENT DIVISION

To be presented at the Fifth International Jacques Cartier Conference,  
Montreal, Quebec, Canada, October 7-9, 1992,  
and to be published in the Proceedings

### **Comparison of Effectiveness of Sub-Slab Ventilation Systems for Indoor Radon Mitigation: A Numerical Study**

Y.C. Bonnefous, A.J. Gadgil, and F. Allard

April 1992



ENERGY & ENVIRONMENT  
DIVISION

1 LOAN COPY 1  
1 CIRCULATES 1  
1 FOR 4 YEARS 1  
1 BLDG. 50 LIBRARY 1

To be presented at the  
5th International Jacques Cartier Conference  
October 7-9, 1992, Montreal, Canada.

## **Comparison of Effectiveness of Sub-Slab Ventilation Systems for Indoor Radon Mitigation: A Numerical Study *(in French)***

Bonnefous Y.C. †† , Gadgil A.J. ‡ , Allard F. \*

‡ Indoor Environment Program,  
Energy and Environment Division,  
Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California.

† Laboratoire des Sciences de l'Habitat,  
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat,  
Vaulx-en-Velin, France.

\* Centre de Thermique,  
INSA de Lyon / CNRS, Villeurbanne, France.

**April 1992**

This research was supported at Indoor Environment Program of Lawrence Berkeley Laboratory by Bonneville Power Administration through interagency agreement No. DE-AI79-90BP06649, and by the Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy, Office of Building Technologies, Building Systems and Materials Division of the U.S. Department of Energy under contract No. DE-AC03-76SF00098.

# **Comparaison à l'aide d'un outil numérique de l'efficacité des Systèmes de Ventilation active du Sol limitant la pénétration du radon dans l'habitat.**

**Bonnefous Y.C. †† , Gadgil A.J. ‡ , Allard F. \***

**‡ Indoor Environment Program ,  
Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California.**

**† Laboratoire des Sciences de l'Habitat,  
E.N.T.P.E, Vaulx-en-Velin, France.**

**\* Centre de Thermique,  
INSA de Lyon / CNRS, Villeurbanne, France.**

Le fonctionnement des Systèmes de Ventilation active du Sol (SVS) a été étudié à l'aide d'un outil numérique précédemment évalué avec succès. Les paramètres explorés sont les perméabilités du sol et du gravier placé sous plancher bas, l'amplitude de la pression appliquée au point d'installation du système, et le mode de fonctionnement: Dépressurisation ou Pressurisation.

Les mécanismes contribuant au succès des deux systèmes sont identifiés. Cette étude numérique montre que la présence d'une couche de gravier sous plancher bas améliore de façon considérable les performances des SVS. Mis à part le cas des sols extrêmement perméables, les systèmes de Dépressurisation ont de meilleures performances que les systèmes de Pressurisation.

## **INTRODUCTION**

Parmi les polluants de l'air intérieur des bâtiments, le risque de décès prématuré associé au radon est le plus élevé (1). La mise en place d'un Système de Ventilation forcée du Sol (SVS) est la technique la plus efficace et la plus employée (2) pour diminuer la concentration de radon dans les maisons avec soubassement.

## **THEORIE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX.**

On distingue deux types de systèmes: 1) les Systèmes de Pressurisation du Sol (SPS) et 2) les Systèmes de Dépressurisation du Sol (SDS).

Les SPS ont pour but de repousser le radon dans le sol profond et/ou de diluer le radon pénétrant dans l'habitation. Le débit rentrant est alors, essentiellement constitué d'air frais insufflé dans le sol par le SPS, voir figure 1. Les SDS ont pour but d'inverser le gradient de pression entre le soubassement et le sol. Ainsi, la force motrice causant la pénétration du radon dans l'habitation est annihilée, et c'est l'air de la cave qui est maintenant aspiré à travers les fissures dans la dalle, dans le gravier, puis dans le SDS, pour être rejeté dans l'atmosphère, voir figure 2.

Si le fonctionnement théorique ne semble pas poser de difficultés, la mise en pratique n'est pas aussi aisée. Les études expérimentales ont permis de mettre en évidence que:

---

Ce projet a été cofinancé au Lawrence Berkeley Laboratory, Indoor Environment Program, par Bonneville Power Administration (BPA) sous le contrat No. DE-A179-90BP06649, et par le Sous-Secretariat pour la maîtrise de l'énergie et les énergies renouvelables, Bureau des Sciences de l'Habitat, Division des Matériaux et Technologies du Bâtiment, U.S.-Département de l'Energie sous le contrat No. DE-AC03-76SF00098. Nous tenons à remercier William Fisk du Indoor Environment Program, Lawrence Berkeley Laboratory, de son aide dans l'élaboration de cette étude. Nous remercions également Frédéric Bois, François Rémi Carrié et Anushka Drescher de leurs commentaires sur cette publication.

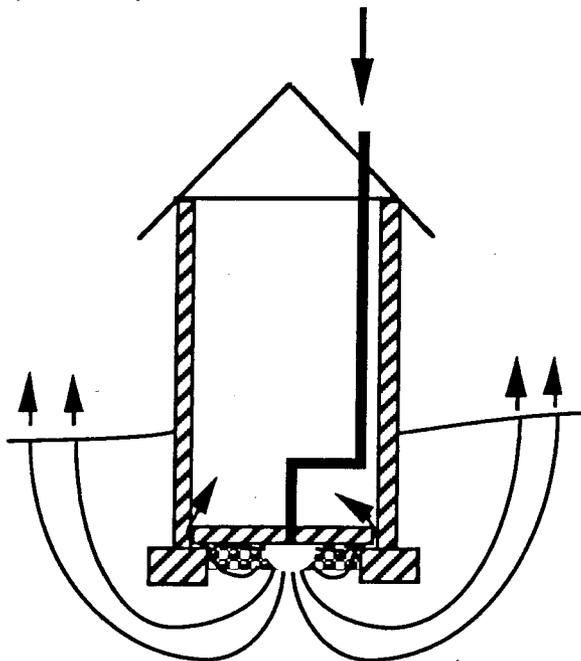
1) Les Systèmes de Dépressurisation du Sol sont plus performants que les Systèmes de Pressurisation du Sol dans la majorité des cas (2). Les SPS ont été plus performants dans une étude réalisée dans la région de Spokane (Etats-Unis) sur des maisons implantées sur des sols très perméables (alluvions de rivières) (3);

2) Une bonne connection de la zone sous plancher bas est importante pour le succès d'un SVS. Les facteurs l'affectant sont: A) la présence ou l'absence d'une couche de gravier très perméable sous plancher bas; B) le cloisonnement complet ou partiel de la région sous plancher bas par des semelles de fondation de murs intérieurs ou par des canalisations. Dans certains états américains, la mise en place d'une couche de gravier très perméable est obligatoire pour l'habitat neuf, afin de faciliter l'installation d'un SVS si cela s'avérait nécessaire (4-6);

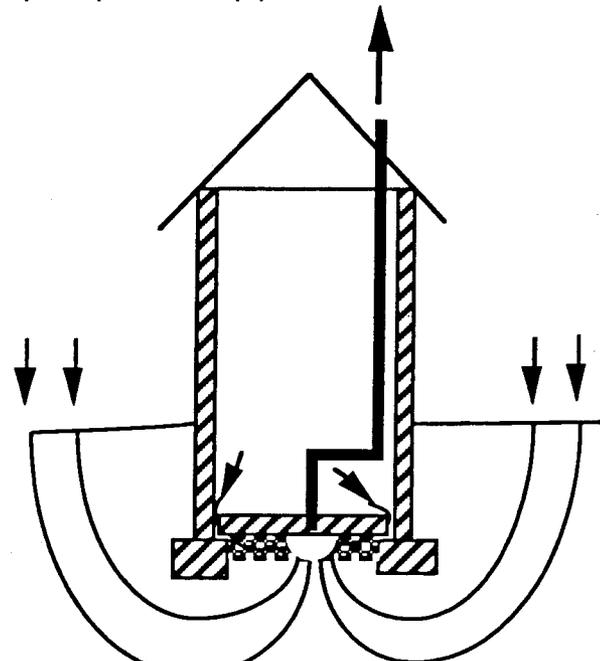
3) La présence d'un puits au point de pénétration du SVS est un paramètre important pour de bonnes performances (7);

4) Un bon colmatage du plancher bas permet une meilleure extension du champs de pression imposé par le SVS et donc de meilleures performances (7);

5) Le rapport des perméabilités du gravier et du sol semble être un paramètre important pour une bonne extension du champ de pression (7).



 gravier



 gravier

**Figure 1:** Schéma théorique du fonctionnement d'un Système de Pressurisation du Sol, SPS.

**Figure 2:** Schéma théorique du fonctionnement d'un Système de Dépressurisation du Sol, SDS.

Nous avons entrepris une étude numérique des SVS pour essayer de mieux comprendre leur fonctionnement et de quantifier l'influence de divers paramètres, à savoir la perméabilité du sol et du gravier, le mode de fonctionnement et la pression appliquée au point d'installation.

## LE MODELE NON-DARCY STAR

La grande majorité des études numériques existantes utilisent la loi de Darcy pour caractériser l'écoulement du gaz dans le sol et le gravier sous plancher bas. Or, lorsqu'un SVS fonctionne, la loi de Darcy n'est plus valide pour décrire cet écoulement.

Gadsby et al. (8) ont développé un modèle analytique utilisant une loi d'écoulement dans les graviers de la forme exponentielle. Toutefois, les résultats de ce modèle sont limités par le fait qu'il néglige les écoulements dans les fissures du plancher bas entre le soubassement et le gravier d'une part, et entre le gravier et le sol

sous-jacent d'autre part, le plancher bas et le sol étant considérés parfaitement imperméables.

Nous avons conçu un modèle tri-dimensionnel, utilisant la méthode des différences finies. Notre modèle, nommé Non-Darcy STAR (Steady state Transport of Air and Radon), résout le système différentiel composé de la loi de Darcy-Forchheimer (9) et de l'équation de continuité pour les gaz incompressibles:

$$\vec{\nabla}p = -\frac{\mu}{k}(1 + c|\vec{V}|)\vec{V} \quad \text{et} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad , \quad (2)$$

où  $p$  est la pression induite (i.e., la variation de pression due à la dépression dans le bâtiment ou à la pression appliquée par le SVS),  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide,  $k$  la perméabilité du milieu,  $c$  le terme de Forchheimer, et  $\vec{V}$  la vitesse de débit du gaz.

Pour cela, nous avons utilisé l'algorithme SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations), décrit par Patankar (10), combiné avec la méthode d'ADI (Alternate Direction Implicit). Non-Darcy STAR utilise les hypothèses suivantes: 1) les différents média (i.e : sol, remblai, gravier) sont homogènes et isotropes, et 2) la poussée d'Archimède est négligée. Le modèle est décrit en détails dans Gadgil et al. (11). Il a été évalué avec succès par comparaison avec des résultats expérimentaux lors d'une étude précédente (7).

Les champs de vitesse et de pression calculés, la concentration en radon dans le sol est calculée en résolvant l'équation suivante:

$$\vec{\nabla} \cdot (D\vec{\nabla}C_{Rn}) - \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}C_{Rn}) + \varepsilon(S - \lambda_{Rn}) = 0 \quad , \quad (3)$$

où  $D$  est le coefficient de diffusion global du radon dans le milieu poreux,  $C_{Rn}$  la concentration en radon dans le gaz circulant dans le sol,  $S$  le taux de production de radon joignant l'écoulement gazeux par mètre cube de milieu poreux,  $\lambda_{Rn}$  l'inverse de la constante de temps du radon, et  $\varepsilon$  la porosité du milieu.

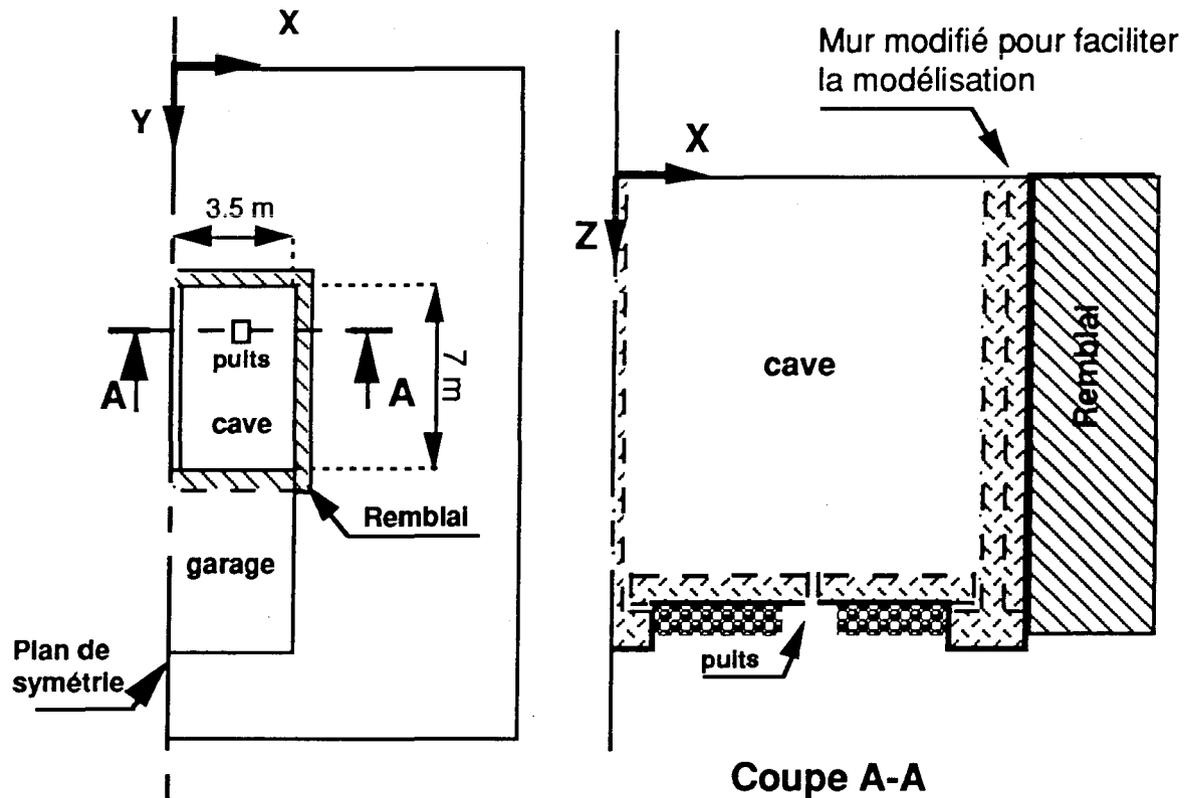
Le modèle numérique utilisé pour résoudre l'équation 3 est similaire à celui utilisé par Loureiro (12). Enfin, le débit de radon pénétrant la cellule d'habitation est calculé et la concentration en radon dans le bâtiment est évaluée en prenant les deux hypothèses suivantes: 1) l'air de la cellule est parfaitement homogène, et 2) le taux de renouvellement d'air est égal à la somme en quadrature (13) du taux typique de 0.4 ACH (14) et du taux additionnel provoqué par le fonctionnement du SVS.

## DESCRIPTION DE L'ETUDE PARAMETRIQUE

L'étude paramétrique a été réalisée pour une maison "type", comportant un axe de symétrie nous permettant de modéliser la moitié du domaine d'intérêt, et ainsi de réaliser un gain considérable en temps ordinateur. La figure 3 représente la maison type telle que modélisée.

La fissuration du plancher bas est ramenée à une fissure équivalente, de 1 mm d'épaisseur, située aux joints semelle de fondation / mur / dalle, et ayant la résistance d'une fissure en L. La face extérieure des murs est déplacée afin d'être alignée avec la face extérieure de la semelle de fondation correspondante. Ceci nous permet une description plus aisée du domaine par des volumes de contrôles. Toute diminution du nombre de volumes de contrôle entraîne un gain de temps ordinateur non-négligeable. Les murs sont parfaitement étanches. Le garage est modélisé par une surface imperméable. Les caractéristiques des graviers, perméabilités et termes de Forchheimer, ont été déterminées en laboratoire (11). Les trois graviers utilisés sont représentatifs des graviers utilisés dans l'état de Washington. Le remblai a la même perméabilité que le sol. L'influence du taux de fissuration de la dalle, de la perméabilité du remblai et de la fissuration des murs latéraux sur les performances des SVS est l'objet de recherches en cours. Les pressions appliquées (en valeur absolue) sont de

60 Pa, limite inférieure de fonctionnement d'un SVS (e.g. après vieillissement), et de 250 Pa, limite supérieure pour des systèmes installés dans des maisons ayant une couche de gravier sous plancher bas. La dépression dans la cave est fixée à -10 Pa. Les systèmes modélisés ne sont pas limités en débit.



**Figure 3:** Maison "type" modélisée par Non Darcy STAR.

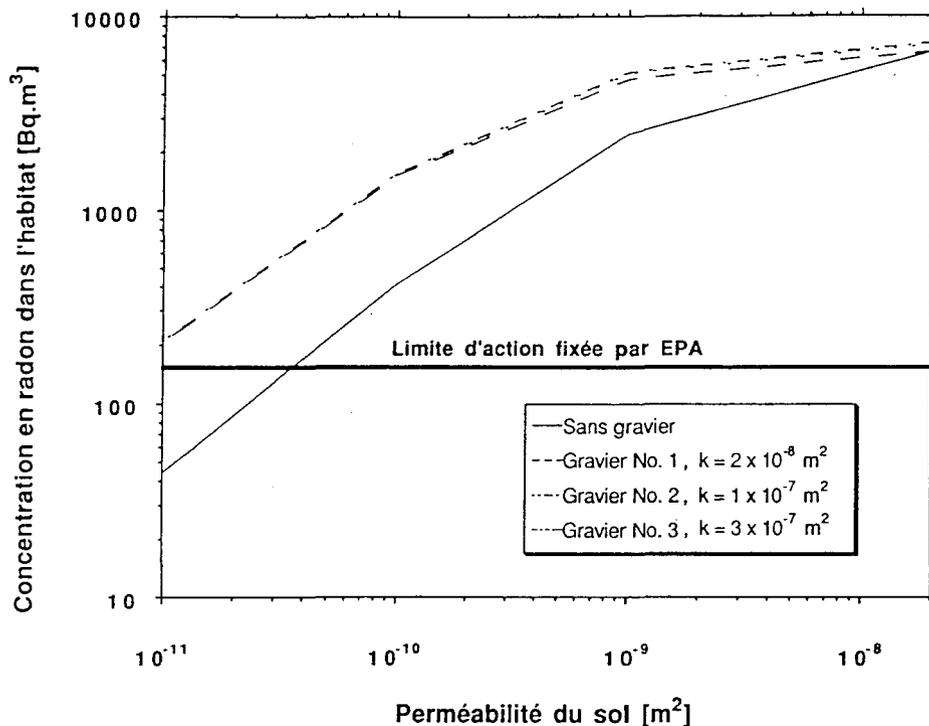
Pour le calcul de la concentration en radon dans l'habitat, nous avons considéré une concentration en radon dans le sol profond de  $58830 \text{ Bq/m}^3$ . Cette concentration correspond à trois fois la valeur moyenne mesurée par Turk et al (15) dans la région de Spokane, Etat de Washington, (le facteur trois donne une marge de sécurité). La couche de gravier sous plancher bas ne produit pas de radon. Le volume du bâtiment est de  $122.5 \text{ m}^3$ .

Le maillage a été conçu de sorte à minimiser le temps ordinateur tout en conservant une précision des résultats suffisante (20% selon nos estimations). Le maillage retenu comporte 37 260 volumes de contrôle.

## RESULTATS

Les performances des SVS sont évaluées sur deux critères: 1) la bonne extension du champ de pression, et 2) le taux de réduction de la concentration en radon dans l'habitation.

En l'absence d'un SVS, la concentration en radon dans l'habitation pour les différentes combinaisons de sol et de gravier est donnée en Figure 4. On constate que la mise en place d'une couche de gravier très perméable peut augmenter de façon considérable la concentration en radon dans les maisons. Cet effet a été étudié par Revzan et al.(16). La mise en place d'une membrane plastique sous la couche de gravier pour minimiser cette augmentation est l'objet d'une étude en cours.



**Figure 4.** Concentration en radon dans la cellule d'habitation de 122.5 m<sup>3</sup> de volume pour un taux de renouvellement d'air de 0.4 ACH et une concentration de radon dans le sol profond de 58830 Bq/m<sup>3</sup>. EPA est l' Environment Protection Agency aux Etats-Unis.

#### SDS et perméabilité du sol et du gravier.

Les Figures 5 et 6 synthétisent les résultats pour un SDS fonctionnant à une pression nominale de -60 Pa et -250 Pa respectivement. Le rapport des concentrations en radon dans l'habitat après et avant mise en place du système est donné entre parenthèse pour chaque point (pourcentages). La pression maximale à 30 cm de tout mur permet de mesurer l'extension du champ de pression, tout en restant suffisamment éloigné de la fissure en L pour pouvoir comparer prédictions numériques et mesures expérimentales.

Un SDS peut avoir de bonnes performances par deux mécanismes:

1) lorsque l'extension du champ de pression est telle que la totalité du gravier sous plancher bas est à une pression inférieure à la pression dans l'habitat, le sens de l'écoulement entre la cave et le sol est inversé. Le système fonctionne de façon optimale, cf. Figure 2.

2) lorsque le débit dans le système est important, le sol subit un "lavage" et la concentration en radon diminue dans le sol avoisinant la structure. Ainsi, même si l'extension du champ de pression est inadéquate pour inverser le sens de l'écoulement entre la cave et le sol, cette diminution de la concentration en radon du gaz pénétrant la cellule d'habitation peut rendre le système efficace.

Les Figures 5 et 6 nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

1) la mise en place d'une couche de gravier est nécessaire pour un fonctionnement optimal du système (inversion du sens de l'écoulement entre la cave et le sol). Toutefois, une diminution de la pression appliquée de -60 Pa à -250 Pa permet de réduire la concentration en radon de façon satisfaisante (diminution du gradient de pression à travers la fissure et "lavage du sol") ;

2) une augmentation de la perméabilité du gravier de  $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$  à  $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  triple en moyenne la pression maximale à 30 cm de tout mur. Cette amélioration de l'extension du champ de pression sous le plancher bas donne une plus grande marge de sécurité pour un fonctionnement optimal du SDS. De plus, elle permettrait de diminuer la

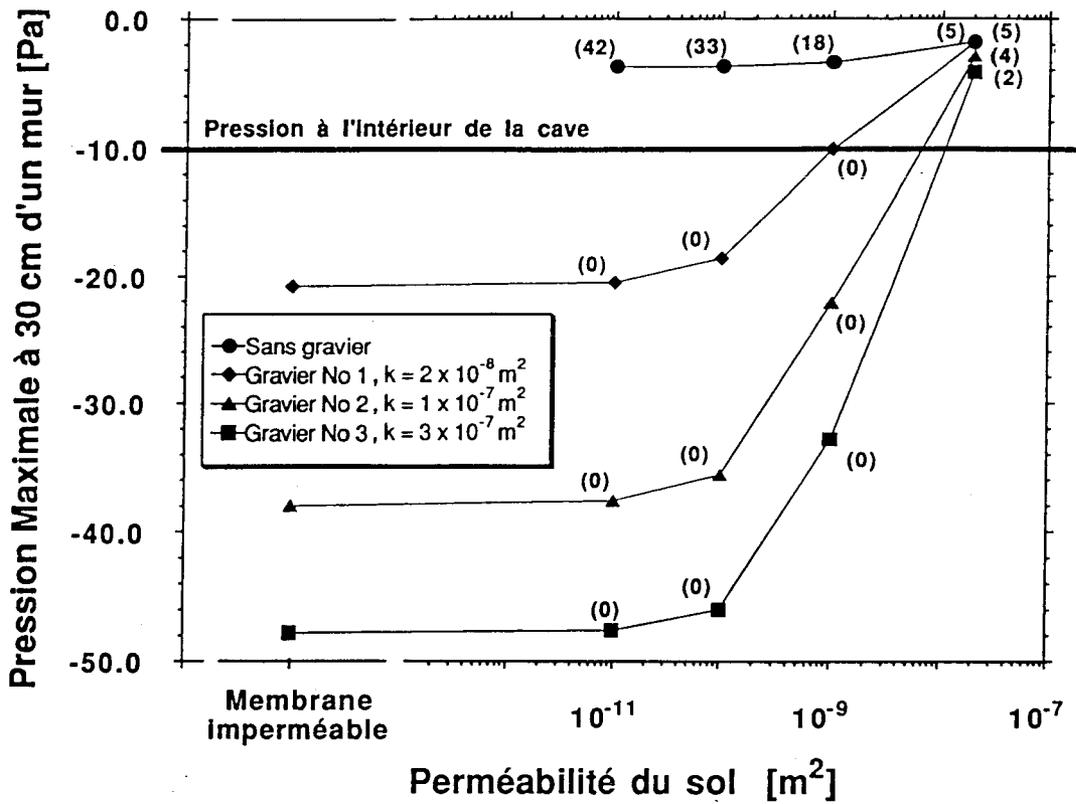


Figure 5. Système de Dépressurisation du Sol. La pression appliquée est de -60 Pa. La pression dans la cave est de -10 Pa. Le pourcentage de la concentration de radon restante est donné entre parenthèses pour chaque point (%).

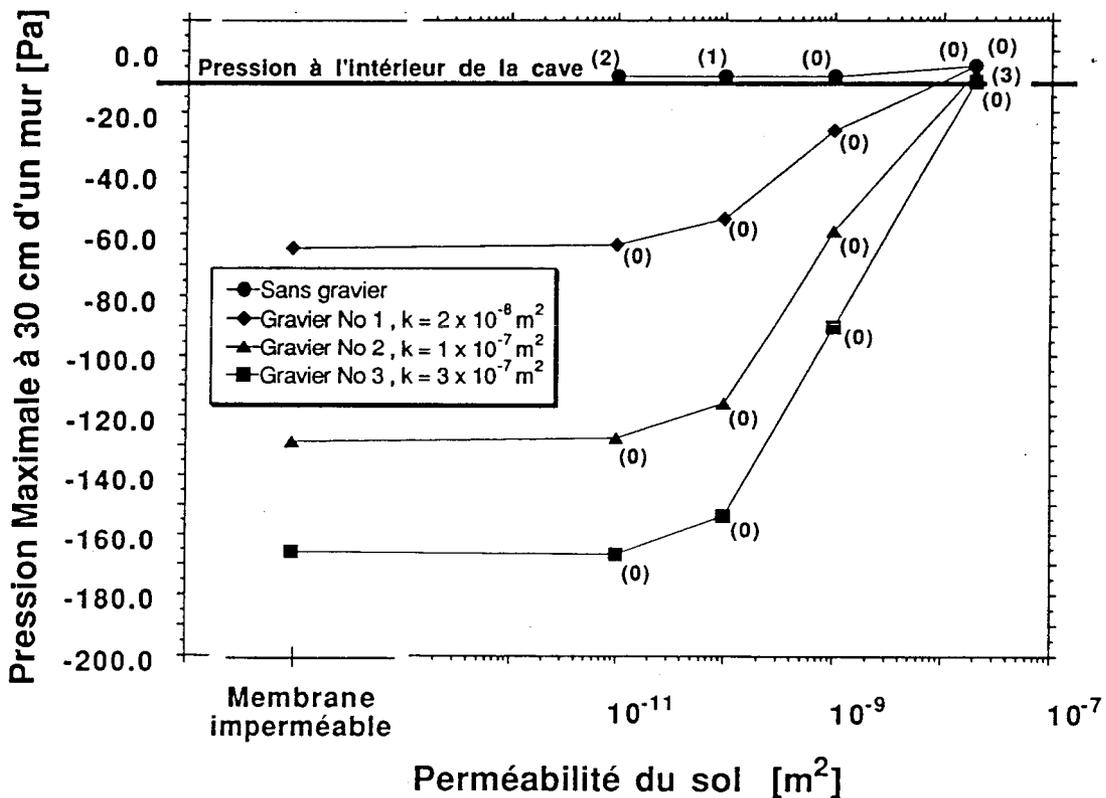


Figure 6. Système de Dépressurisation du Sol. La pression appliquée est de -250 Pa. La pression dans la cave est de -10 Pa. Le pourcentage de la concentration de radon restante est donné entre parenthèses pour chaque point (%).

pression appliquée par le système. Cela peut signifier dans certains cas la mise en place d'un système de moindre puissance, ayant un coût d'achat et de fonctionnement plus faible;

3) lorsque le rapport des perméabilités du gravier et du sol est supérieur à 1000, le sol peut être considéré comme étant parfaitement étanche. La totalité de l'air aspiré par le SDS provient de l'intérieur de la cave. Dans cette configuration, la pression appliquée peut être augmentée de façon considérable (théoriquement jusqu'à -10.1 Pa pour une dépression dans la cave de -10 Pa) sans compromettre le fonctionnement optimal du système, rendant ainsi l'utilisation de systèmes passifs envisageable (convection naturelle dans la conduite d'évacuation du système traversant l'habitat chauffé).

### SPS et perméabilité du sol et du gravier.

Similairement, les Figures 7 et 8 synthétisent les résultats pour un SPS fonctionnant à une pression nominale de +60 Pa et +250 Pa respectivement.

En l'absence d'une couche de gravier, un SPS ne peut pas avoir une efficacité totale (réduction de la concentration en radon de 100%). Pour de faible pressurisation (+60 Pa) et un sol peu perméable ( $k = 10^{-11} \text{ m}^2$ ), la mise en place d'un SPS peut même résulter en une augmentation de la concentration en radon dans l'habitat, la dilution apportée ne compensant pas l'augmentation du débit pénétrant. La mise en place d'une couche de gravier est cruciale pour un fonctionnement optimal d'un SPS.

Lorsque qu'une couche de gravier n'émanant pas de radon est mise en place sous le plancher bas, le fonctionnement optimal d'un SPS dépend de plusieurs mécanismes:

1) Une bonne extension du champ de pression assure qu' aucune région de la couche de gravier n' est en dépression ( $p < 0 \text{ Pa}$ ). Lorsque cette condition est satisfaite, le radon ne peut plus pénétrer la couche de gravier par convection. Cette condition n'est pas remplie pour le gravier No 1 ( $k = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ ) et une pression appliquée de +60 Pa (cf Figure 7).

2) Toutefois, le système peut avoir de bonnes performances malgré une extension du champ de pression inadéquate, si le débit d'air insufflé par le SPS est important (cas d'un sol très perméable). En effet le sol adjacent à la structure est "lavé" par l'écoulement d'air (radon repoussé vers la surface du sol) et la concentration en radon du gaz pénétrant le gravier est diminuée.

3) Le sol doit être suffisamment perméable de sorte que le débit entre le gravier et le sol sous-jacent ne soit pas nul. Dans ce cas, le radon est "repoussé" par l'air insufflé par le système et ne peut pas diffuser à contre courant. Dans le cas d'un sol peu perméable ( $k \leq 10^{-11} \text{ m}^2$ ), le débit d'air à l'interface gravier/sol est presque nul (le sol peut être considéré comme étant imperméable), et le radon diffuse dans le gravier où il est entraîné à l'intérieur de la cellule d'habitation par l'écoulement provoqué par le SPS.

4) Une augmentation de la pression appliquée par le SPS peut palier au problème de la diffusion du radon dans le gravier en augmentant le taux de renouvellement d'air de la cellule d'habitation (dilution). Ceci implique un surcoût énergétique important.

En conclusion, un fonctionnement optimal d'un SPS requiert un sol et un gravier très perméable.

### Discussion

Notre étude sur une maison "type" montre qu'un SDS est généralement plus performant qu'un SPS. Un SPS est plus performant qu'un SDS dans le seul cas d'un sol extrêmement perméable ( $k = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ ). Pour des combinaisons de graviers très perméables ( $k \geq 10^{-7} \text{ m}^2$ ) et de sols perméables ( $k = 10^{-10} \text{ à } 10^{-9} \text{ m}^2$ ), les deux systèmes ont des performances équivalentes. Ceci est résumé en Tableau 1:

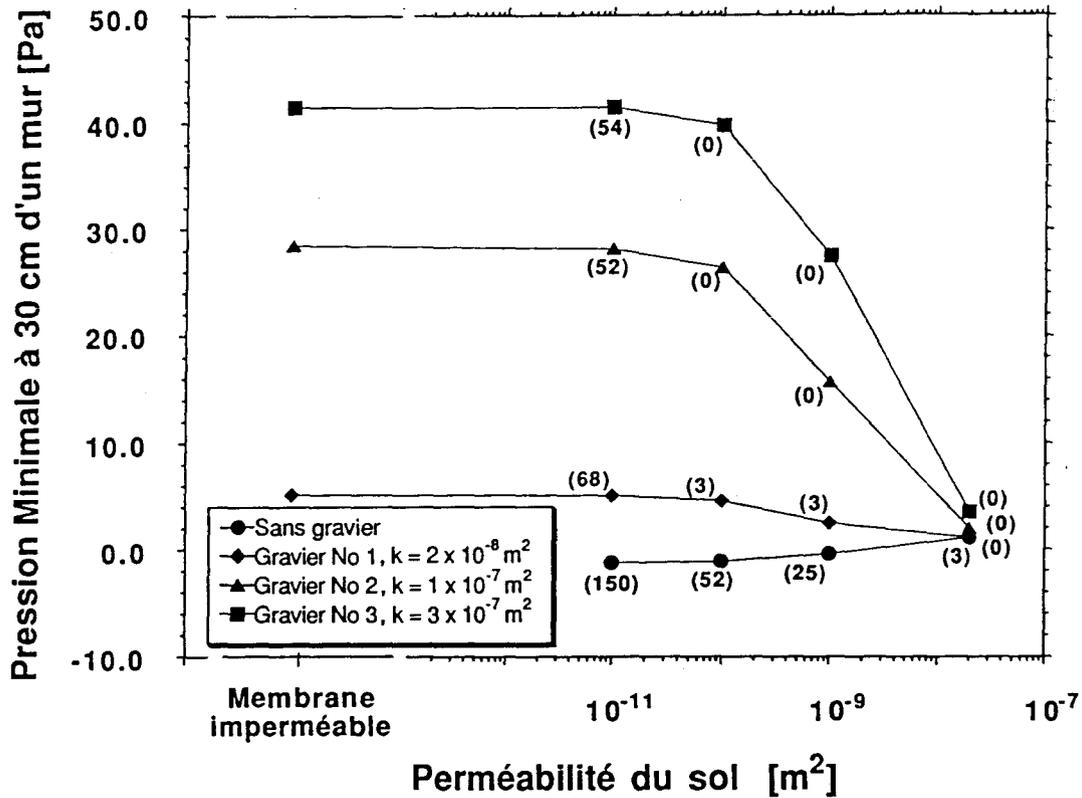


Figure 7. Système de Pressurisation du Sol. La pression appliquée est de +60 Pa. La pression dans la cave est de -10 Pa. Le pourcentage de la concentration de radon restante est donné entre parenthèses pour chaque point (%).

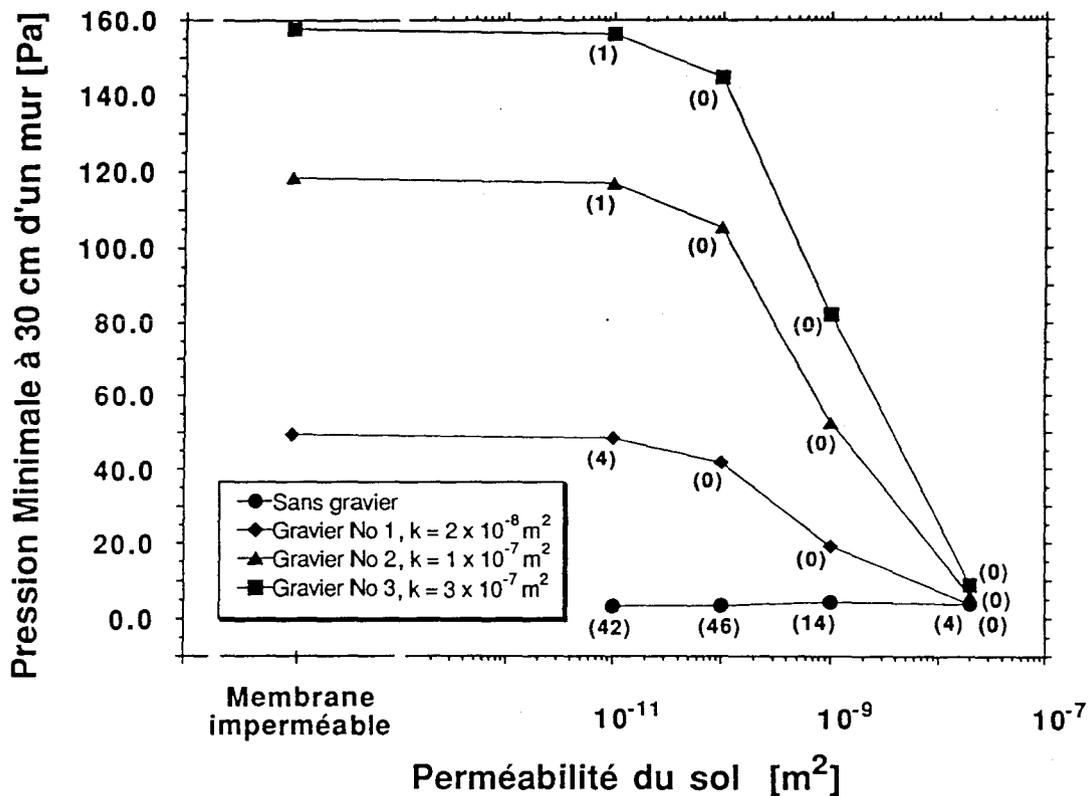


Figure 8. Système de Pressurisation du Sol. La pression appliquée est de +250 Pa. La pression dans la cave est de -10 Pa. Le pourcentage de la concentration de radon restante est donné entre parenthèses pour chaque point (%).

**Tableau 1.** Système le plus performant pour les différentes combinaisons de sol et de gravier d'après les prédictions de Non-Darcy STAR..

Perm. gravier	Perm. sol	$2 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$
	m <sup>2</sup>				
Sans gravier		SPS	SDS	SDS	SDS
$2 \times 10^{-8}$		SPS	SDS	SDS	SDS
$1 \times 10^{-7}$		SPS	SDS/SPS	SDS/SPS	SDS
$3 \times 10^{-7}$		SPS	SDS/SPS	SDS/SPS	SDS

Une perméabilité de  $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$  est une valeur très élevée pour un sol. Elle nous a permis cependant de mettre en évidence la supériorité des SPS sur les SDS pour le cas des sols très perméables. Des recherches en cours (17) montrent que les modèles numériques utilisant les mêmes hypothèses que Non-Darcy STAR prédisent un débit de gaz pénétrant dans l'habitat en l'absence d'un SVS huit fois moindre que le débit mesuré expérimentalement. Le phénomène de *lavage du sol* étant lié au débit de gaz dans le sol, la perméabilité du sol à laquelle un SPS devient plus performant qu'un SDS est probablement plus faible que celle prédite par Non-Darcy STAR.

Mis à part le cas des SPS en l'absence d'une couche de gravier et pour une perméabilité du sol inférieure ou égale à  $10^{-10} \text{ m}^2$ , une augmentation de la valeur absolue de la pression appliquée de 60 à 250 Pa permet d'obtenir un taux de réduction de la concentration en radon dans l'habitat satisfaisant.

Cependant, ceci peut se traduire par une augmentation non négligeable du taux de renouvellement d'air du bâtiment, e.g: pour un SPS fonctionnant à une pression nominale de +250 Pa en présence d'un gravier très perméable ( $k = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ) et d'un sol peu perméable ( $k \leq 10^{-11} \text{ m}^2$ ), le taux de renouvellement d'air passe de 0.4 ACH à 1.95 ACH. Le surcoût énergétique du système ne serait donc pas négligeable. Pour des systèmes fonctionnant dans des sols extrêmement perméables, le débit associé à une dépression de -250 Pa est trop important pour être réalisé dans la pratique ( $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Une membrane plastique sous la couche de gravier pourrait être bénéfique aux deux systèmes, en permettant une meilleure extension du champ de pression (SPS et SDS) et en éliminant l'entrée diffusive du radon dans la couche de gravier (SPS).

Outre ses performances généralement moins bonnes que celles d'un SDS, un SPS comporte deux inconvénients majeurs: 1) le débit d'air pénétrant l'habitat induit par le système, peut entraîner d'autres polluants (e.g. termiticides) à l'intérieur du bâtiment; 2) l'air insufflé par le système est à la température extérieure, un SPS fonctionnant par un hivers rigoureux pourrait causer le gel des canalisations sous plancher bas.

## CONCLUSION

L'étude numérique des SVS réalisée à l'aide du modèle non-Darcy STAR nous a permis d'identifier les mécanismes contribuant au succès de ces systèmes: inversion du sens de l'écoulement entre la cave et le sol et diminution de la concentration en radon dans le sol par "lavage" pour les SDS; pressurisation de la totalité de la couche de gravier évitant toute entrée convective dans la couche de gravier, diminution de la concentration en radon dans le sol par "lavage", débit non nul à l'interface sol/gravier pour éviter la diffusion du radon dans la couche de gravier et dilution de la concentration en radon pénétrant la couche de gravier pour les SPS.

Une couche de gravier très perméable est nécessaire pour des performances optimales des SVS. Le choix d'un gravier très perméable ( $k = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ) permet d'augmenter considérablement les performances des systèmes et d'accroître les

marges de sécurité. Dans certains cas (e.g. SDS et perméabilité du sol inférieure ou égale à  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>), elle permet d'envisager l'utilisation de systèmes passifs.

Les systèmes de dépressurisation sont généralement plus performants que les systèmes de pressurisation à l'exception des sols extrêmement perméables ( $k = 10^{-8}$  m<sup>2</sup>).

## REFERENCES

- (1) Nero, A. V. "Les contrôles de la pollution dans les logements". *Pour la Science*, No 129, pp 24-32, Juillet 1988.
- (2) Henschel, B. "Radon Reduction Techniques for Existing Detached Houses - Technical guidance third edition", U.S. EPA, Office of Research and Development, Washington D.C. 20460, First Draft, January 1992, Document en préparation.
- (3) Turk, B. H.; Prill, R. J.; Fisk, W. J.; Grimsrud, D. T.; Moed, B. A.; and Sextro, R. G. "Radon and Remedial Action in Spokane River Valley Homes. Volume 1: Experimental Design and Data Analysis". Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-23430, University of California, Berkeley, CA, December 1987.
- (4) EPA "Radon reduction techniques for detached houses, technical guidance (second edition)", U.S. EPA, Report EPA/625/5-87/019, 1987.
- (5) WSBC [Washington State Building Code Council] "Washington State ventilation and indoor air quality code, chapter 5 radon resistive construction standards". Published by the State of Washington, 1990.
- (6) Nuess, M. "Northwest residential radon standard volume 1 : project report". Bonneville Power Administration Report, Portland, OR, 1989.
- (7) Bonnefous, Y.C.; Gadgil, A. J.; Fisk, W.J.; Prill, R.J.; Nematollahi, A. "Field Study & Numerical Simulation of Subslab Ventilation Systems." *Environmental Science and Technology*, à paraître, 1992.
- (8) Gadsby, K. J.; Reddy, T. A.; Anderson, D.F.; and Gaigen, R.; Craig, A. B. "The effect of subslab aggregate size on pressure field extension". In: *Proceedings of the 1991 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*, vol. 4, April 2 - 5, Philadelphia, PA. Published by the U.S. EPA.
- (9) Forchheimer, P.H. *Z. Ver. Dtsch. Ing.* 45, pp. 1782-1788, 1901.
- (10) Patankar, S. *Numerical heat transfer and fluid flow* McGraw-Hill Book Company, New-York, 1980.
- (11) Gadgil, A. J.; Bonnefous, Y.C.; Fisk, W.J.; Prill, R.J.; Nematollahi, A. "Influence of subslab aggregate permeability on SSV performance". Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-31160, Berkeley, CA, 1991.
- (12) Loureiro, C. O.; Abriola. L. M.; Martin, J. E.; and Sextro R. G. "Three Dimensional Simulation of Radon Transport into Houses Under Constant Negative Pressure", *Environ. Sci. and Tech.*, Vol. 24, pp.1338-1348, 1990.
- (13) Sherman, M.H. "Superposition in infiltration modeling", Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-29116, Berkeley, CA. Submitted to *Indoor Air*, 1992.
- (14) Palmiter, L.; and Brown, I. "Northwest residential infiltration survey: analysis and results". Ecotope, 2812 East Madison, Seattle, WA, 1989.
- (15) Turk, B. H.; Harrison, J.; and Sextro R.G. "Characterizing the occurrence, sources, and variability of radon in Pacific Northwest home". *J. Air Waste Manage. Assoc.* 40, pp. 498-506, 1990.
- (16) Revzan, K.L.; Fisk, W.J.; and Gadgil A.J. "Modeling radon entry into houses with basements: model description and verification". *Indoor Air* Vol 1, No. 2, pp 173-189, 1991.
- (17) Garbesi, K.; Sextro, R.G.; Fisk, W.J.; Modera M.P; and Revzan, K.L. "Soil-Gas Entry into an Experimental Basement: Model-Measurement Comparisons and Seasonal Effects". Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-31873, Berkeley, CA. Submitted to *Environ. Sci. Technol.*, 1992.