

# INFLUENCE DES FONDANTS ROUTIERS SUR LES EAUX SOUTERRAINES EN REGION WALLONNE

Francis Staquet\* et Didier Laurent\*\*

\* Ministère de l'Équipement et des Transports  
de la Région Wallonne, Direction Générale  
des Autoroutes et des Routes  
8, Boulevard du Nord 5000 Namur  
TEL +32-71-660481/FAX +32-71-660499  
E-mail adress : mcmarchot@met.be

\*\* Service d'Hydrogéologie  
Université Libre de Bruxelles  
50 Avenue Franklin Roosevelt, C.P. 165/25  
1050 Bruxelles  
TEL +32-2-6502909/FAX +32-2-6503560  
E-mail adress : dilarent@ulb.ac.be

## 1. Résumé et introduction

Evoquée lors du Congrès du Service hivernal de LULEA en 1998, l'étude proposée par la Direction Générale des Autoroutes et des Routes du Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne est basée sur les principaux acquis de l'étude détaillée de l'influence des fondants routiers sur les aquifères de la Région Wallonne par le Service d'Hydrogéologie de l'Université Libre de Bruxelles (Laurent D. et Laurent E., 2000 et 2001). Notre texte comporte trois parties.

Il débute par un état général de l'ensemble des aquifères de la Région Wallonne sur base d'une enquête auprès des producteurs d'eau. Par comparaison aux résultats de l'étude menée en 1997 par le CEBEDEAU, on commente l'évolution générale des aquifères et quelques cas ponctuels de pollution salée.

Dans la deuxième partie, on examine les résultats d'une série d'analyse des rivières et de la nappe dans deux sites particulièrement sensibles.

Le premier site comprend le périmètre de protection étendu d'un site d'eau minérale très pure et particulièrement peu chargée en sodium. C'est le site du bassin hydrographique des affluents du lac de Warfaaz et de la rivière Wayai.

Le deuxième site, situé dans une zone sensible de par la nature de l'aquifère, se trouve à proximité d'une route appartenant au réseau à grand gabarit et située d'un point de vue climatique en zone ardennaise. Dans ce site, plusieurs forages ont permis non seulement de suivre l'évolution de la chimie des eaux mais aussi d'effectuer des essais de traçage et de pompage. Les résultats des évolutions des eaux au cours de l'année et des deux essais sont examinés en détail et interprétés en terme de comportement différent des ions de l'eau au cours du transport dans les fossés de ruissellement et dans l'aquifère.

La troisième partie comporte l'étude originale des équilibres thermodynamiques entre l'eau et les minéraux des aquifères. Elle permet d'expliquer les comportements différents des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  au cours de la migration des eaux. Elle amène quelques recommandations sur la nature minéralogique des surfaces de ruissellement et sur les traitements des eaux.

## 2. L'Enquête Générale

La situation a peu évolué entre 1996 et 1999 et l'état de l'ensemble des aquifères reste très favorable. Comme le confirment les teneurs moyennes entre 1992 et 1998 du relevé général de la D.G.R.N.E, les teneurs de chlorures supérieures à 50 mg/l restent rares.

## 3. Le Site Minéralier

Le lac de Warfaaz se situe dans une bande du groupe primaire, système Cambrien, étage Salmien inférieur. Celui-ci est constitué de quartzophyllades et phyllades. Cette bande est entourée au nord et au sud par des quartzites et phyllades noirs de l'étage Revinien. La vallée du Wayai en amont du lac, quant à elle est sise dans une bande d'alluvions modernes.

La situation des points de prélèvement en aval du lac de Warfaaz est illustrée à la figure 1. Une carte plus détaillée indique les prélèvements autour du lac lui-même et en particulier entre le lac et un dépôt de sel routier situé en amont du lac (Figure 2).

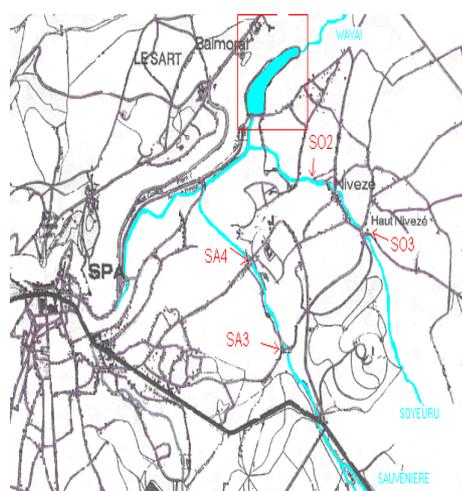


Figure 1 : Carte des Prélèvements en Aval du Lac de Warfaaz

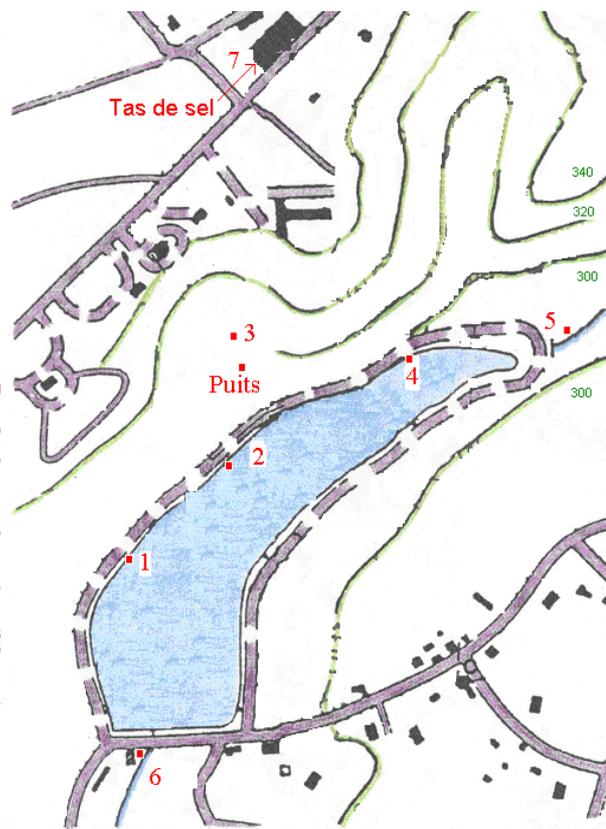


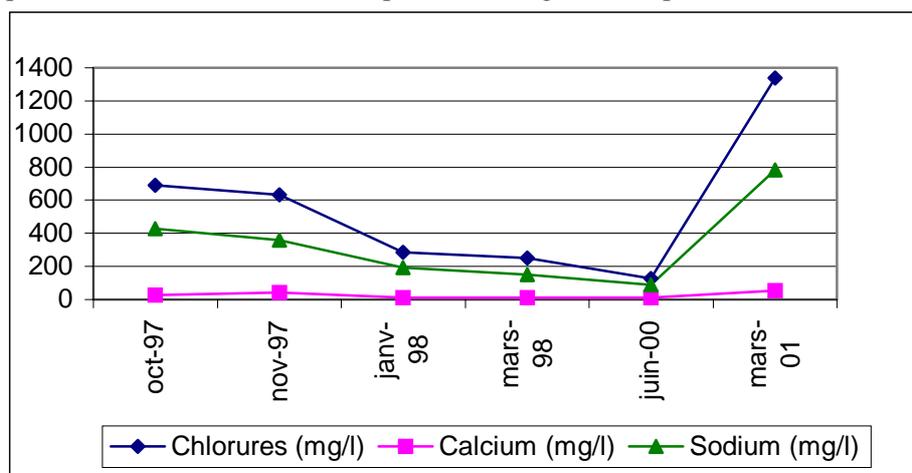
Figure 2 : Carte des Prélèvements Autour du Lac de Warfaaz

Les campagnes d'analyses chimiques de l'ensemble des points entre 1997 et 2001 indiquent un état général très bon. Le tableau 1 reprend par exemple les analyses des prélèvements de juin 2000.

Pts	pH	Cond. μS/cm	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l	Mg <sup>++</sup> Mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Al μg/l	Fe μg/l
Puits	5,35	240	4	26,8	65,2	<0,2	2,43	10,5	11	0,71	6,92	220	16162
1	6,99	521	11	41,7	127,6	10,7	10,5	3,19	87,8	2,63	5,22	49	58
2	3,97	457	0	41,2	99,3	25	11,7	10,5	45,5	2,9	8,56	1724	391
3	4,22	420	0	55,9	71,2	50,1	14,9	7,75	43,6	4,47	8,77	2082	26
4	5,67	273	0	26,3	68,1	1,34	6,03	6,97	34,3	1,1	7,85	69	122
5	7,03	135	19	20,6	13	6,87	12,6	2,93	8,33	1,96	6,33	149	120
6	7,32	127	23	16,1	11,9	6,03	12	2,39	7,31	2,7	4,88	124	162
7	7	272175	127	2080	80341	<20	607	135	49425	455	<20	<1000	3138
SO3	6,87	69	13	10,5	5,9	1,29	7,58	0,88	4,42	0,63	5,24	167	55
SO2	7,66	121	32	13	6,96	4,77	14,9	1,38	6,29	2,19	5,83	99	59
SA3	7,13	73	13	9,75	7,81	1,14	6,89	1,27	5,27	0,52	5,74	87	53
SA4	6,77	96	21	11,4	8,99	3,52	9,07	1,9	6,23	1,19	6,29	56	178

Tableau 1 : Tableau des Analyses de Juin 2000

L'influence du dépôt de sels se marque sur les points situés en aval de celui-ci ; en particulier pour les points 1,2 et 3 pour l'eau de surface et le puits pour l'eau souterraine. L'examen de l'historique des teneurs en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  du point 1 à la figure 3 est particulièrement instructif.



**Figure 3. Concentration en Chlorures, Calcium et Sodium au Point 1**

On observe, en 1998, une chute importante des teneurs due au recouvrement systématique par des bâches suite à l'étude de Parma (1998).

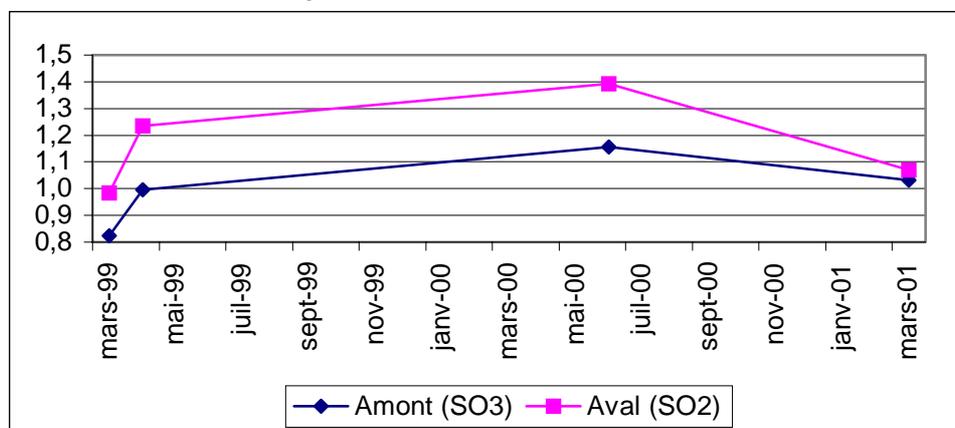
En 2001, au cours de la campagne de prélèvements, on a observé que le recouvrement après chaque épandage n'a pas été systématique. Cette lacune se traduit dans la figure 6 par une remontée spectaculaire en mars 2001.

Le futur bâtiment de couverture résoudra définitivement le problème, mais en attendant le recouvrement systématique par des bâches après chaque épandage s'impose.

Le rapport des concentrations  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , proche de 1 pour les eaux de surface (affluents du lac) et au environ de 0,3 pour le puits de Warfaaz, indique pour les eaux de surface peu de différenciation du comportement des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , à l'inverse des eaux souterraines pour lesquelles le comportement de ces ions est différent.

Le rapport des concentrations  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  passant de 1 à 1,4 entre les points de prélèvement amont et aval du Soyeuru indique la présence entre ces deux points de rejets d'eaux domestiques.

L'accroissement en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  entre l'eau de distribution et l'eau usée domestique s'élève en moyenne de 20 à 50 mg/l de  $\text{Cl}^-$  et de 40 à 70 mg/l de  $\text{Na}^+$ . Ce qui élève le rapport  $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$  à des valeurs de l'ordre de 1,5 à 2,26 suivant Bond et Al.(1974). Le rapport mesuré en rivière dépend du rapport entre le débit naturel et le débit d'eau usée, mais l'accroissement vers des valeurs dépassant nettement l'unité correspond, dans notre site, aux points proches de rejets. Cet accroissement est illustré à la figure 4.



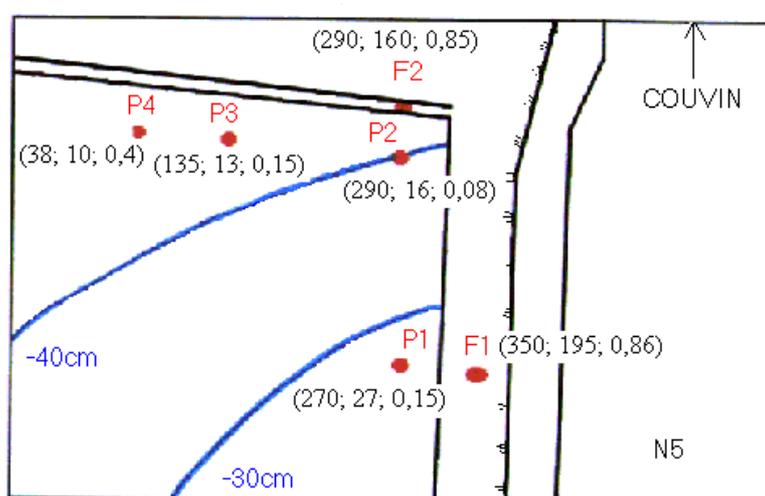
**Figure 4 : Rapport  $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$  pour le Soyeuru**

#### 4. Le Site Autoroutier

Le site est situé le long de la N5 entre Frasnes et Couvin (Figure 1) à l'endroit précis du futur contournement routier de Couvin, non loin de l'Eau Noire. Le site se trouve sur le bord Sud du Synclinorium de Dinant.

La géologie du site est marquée par la phase transgressive du Couvinien Supérieur au Frasnien Supérieur durant laquelle apparaît une série sédimentaire schisto-calcaire avec sur toute la hauteur, des faciès coralligènes, fréquemment de nature récifale. Il s'agit d'une sédimentation néritique de plate-forme, à dominante calcaire, d'eau peu profonde. Par contre dans ce même cadre, apparaît vers le Sud, en lieu et place de la sédimentation calcaire, une sédimentation terrigène de type pélitique, à laquelle sont associées, à des degrés divers, des constructions coralliennes.

Notre site est donc caractérisé par la présence de calcschistes et de silts pouvant passer à des grès. Les forages de reconnaissance pour le contournement de Couvin et les forages de notre étude indiquent une couverture de limon surmontant des silts ou des grès avec des passées très argileuses et une importante épaisseur de calcschiste débutant entre 8 m et 14 m de profondeur. La situation des forages destinés à nos essais et aux campagnes d'analyses chimiques est donnée à la figure 5.



**Figure 5. Situation des forages et Comportement Spatial des Ions dans l'Aquifère ( $\text{Cl}^-$  (mg/l);  $\text{Na}^+$  (mg/l);  $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ ).**

Cette même figure donne les isopièzes de l'aquifère des calcschistes et des grès.

En résumé de la description géologique des forages, il apparaît que la roche aquifère constituée de calcschistes, de calcarénite et d'un silt est surmontée de couches plus argileuses pouvant jouer le rôle d'aquitard très peu perméable.

L'étude minéralogique par diffraction de rayons X et par examen de lames minces, nous permet d'identifier la calcite comme composante de la fraction carbonatée dominante dans le calcschiste. La fraction schisteuse moins abondante dans cette roche comporte du quartz, de la muscovite, un peu de feldspath mais surtout des argiles : de la kaolinite, de l'illite, de la chlorite et de la montmorillonite. Au microscope, la muscovite entrelardée de chlorite est bien visible.

Pour définir les paramètres d'écoulement de l'aquifère, un essai de pompage d'un débit de  $3,13 \text{ m}^3/\text{h}$  sur le puits P3 avec les autres puits comme piézomètres fut réalisé. L'effet bicouche n'apparaît pratiquement pas, confirmant la très faible perméabilité des passées plus argileuses dans les roches surmontant l'aquifère.

Les résultats caractéristiques de l'essai sont repris au tableau 2.

Piézomètre	Transmissivité	Stockage
P3	1,42 m <sup>2</sup> /h	-
P2	1,14 m <sup>2</sup> /h	1,28.10 <sup>-4</sup>
P4	3,49 m <sup>2</sup> /h	9,43.10 <sup>-4</sup>

**Tableau 2. Résultats Caractéristiques de l'Essai**

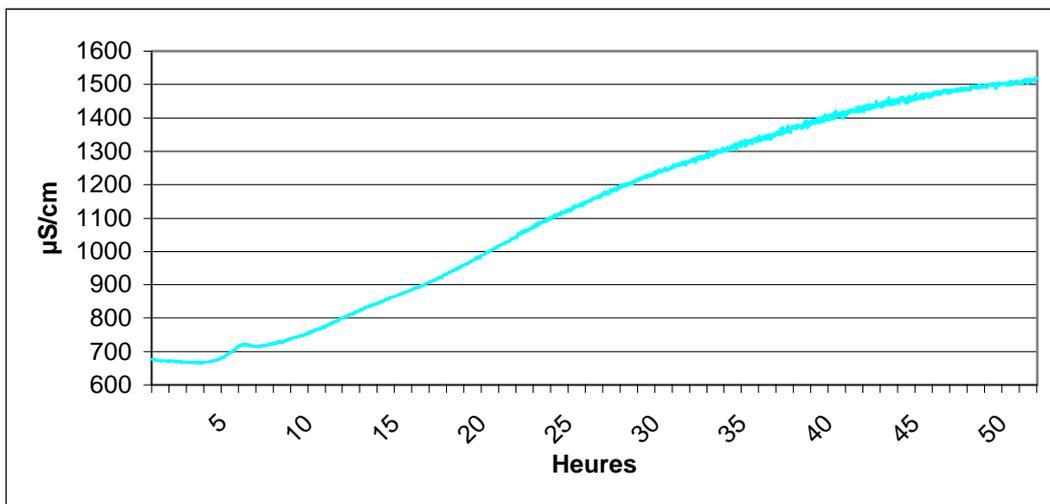
Ces chiffres confirment l'anisotropie et le caractère pratiquement captif de l'aquifère.

La protection verticale contre l'infiltration des eaux salées est donc assez bonne sauf dans les zones où les fossés de ruissellement ont recoupé les horizons argileux surmontant l'aquifère.

Pour définir les paramètres de dispersion au sein de l'aquifère, un essai de traçage radial convergent avec une solution saturée en NaCl a été effectué.

L'injection continue dans le puits P2 fut faite au débit de 0,5m<sup>3</sup>/h pour un pompage sur P3 au débit de 3,45 m<sup>3</sup>/h.

L'interprétation des résultats à partir de la courbe de conductivité mesurée en P3 (Figure 6), se base sur la méthode du point commun et les courbes caractéristiques de Sauty J.P.(1978) et Laurent E. (1979).



**Figure 6. Courbe de conductivité.**

Le contrôle préliminaire des conditions d'injection se base sur le modèle radial généralisé (Laurent E., 1992).

Le calcul des paramètres de dispersion à partir de la courbe expérimentale donne les résultats suivants :

- dispersivité radiale  

$$\alpha_r = r/4B = 20 \text{ m}/1,2 = 16,67 \text{ m}$$
- vitesse moyenne de pores  

$$V_p = \frac{z}{t} \bullet \frac{r}{B} = 0,2133 \text{ m/h}$$
- durée du parcours  

$$t_p = r/V_p = 20/0,2133 = 93,75 \text{ h}$$
- porosité dynamique  

$$\omega = (t_p \cdot Q)/(\pi \cdot e \cdot r^2) = 1,71 \cdot 10^{-2}$$

Le tableau 3 compare les résultats de l'essai à Couvin aux données analogues des aquifères principaux à roches calcaires et crayeuses en Région Wallonne.

Aquifère	Porosité dynamique	Coefficient de dispersion
Calcaire carbonifère : Zone karstique du Tournaisis	$\omega_d = 5,81 \cdot 10^{-2}$	$\alpha_L = 234$ m
Calcaire carbonifère : Zone de Charleroi	$6 \cdot 10^{-3} < \omega_d < 2,5 \cdot 10^{-2}$	$3,75$ m $< \alpha_R < 30$ m
Crétacé de la Haine Havrée	$\omega_d = 2,87 \cdot 10^{-2}$	$\alpha_R = 6,0$ m
Crétacé du Brabant	$6,5 \cdot 10^{-2} < \omega_d < 9,85 \cdot 10^{-2}$	$7,0$ m $< \alpha_R < 15,7$ m
Calcschiste de Couvin	$\omega_d = 1,71 \cdot 10^{-2}$	$\alpha_R = 16,67$ m

**Tableau 3. Paramètres de Dispersion.**

Le site expérimental est bien représentatif de ce type d'aquifère où la porosité de fissure donne des paramètres favorables à la dispersion des sels dissous.

Ce tableau fournit aussi les valeurs numériques indispensables pour modéliser le terme dispersion d'une équation de transport des ions provenant des fondants routiers.

Dans le site retenu, quatre campagnes d'analyses chimiques des eaux des fossés de collecte des ruissellements de la route et des quatre puits furent effectuées. Les dates choisies couvrent les périodes avant (une campagne), pendant (deux campagnes) et juste après (une campagne) les épandages hivernaux des fondants.

A titre d'exemple, le tableau 4 donne les résultats de la campagne du 26 avril 2001.

	pH	Cond. mS/cm	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	CO <sub>2</sub> d. mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l	Mg <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	DCO mgO <sub>2</sub> /l	Si mg/l	Al mg/l	Fe mg/l
<b>P1</b>	7,7	1,22	265	10	24	275	6	198	20	23	1,7	<15	4,6	<0,05	<0,05
<b>P2</b>	7,0	1,21	270	49	21	285	4	197	21	25	1,6	<15	5,3	<0,05	<0,05
<b>P3</b>	7,0	0,847	270	49	31	130	20	148	13	12	1,1	<15	4,7	<0,05	<0,05
<b>P4</b>	7,2	0,579	320	37	31	26	32	132	4,5	8	1,7	<15	0,5	<0,05	0,1
<b>F1</b>	7,3	0,938	275	25	20	172	<0,1	97	3,1	102	3,2	<15	3,0	<0,05	<0,05
<b>F2</b>	7,0	2,13	180	33	13	620	<0,1	68	2,4	375	4,7	<15	0,6	<0,05	0,4

**Tableau 4. Campagne du 26 avril 2001.**

Les paramètres analysés permettent de suivre les ions des sels, mais comportent aussi les ions nécessaires à la balance ionique et au calcul des activités pour les diagrammes d'équilibres thermodynamiques ainsi que les métaux lourds non repris au tableau.

Les résultats des ions caractéristiques des fondants routiers sont repris au tableau 5.

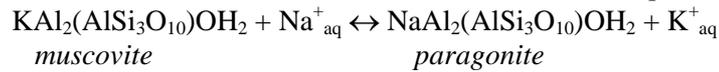
<b>F1</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]	<b>F2</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]	<b>P1</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]
<b>30/05/00</b>	36	22	37	0,92		33	24	37	1		-	-	-	-
<b>24/11/00</b>	64	41	42	1,50		97	24	22	1,68		200	26	275	0,14
<b>23/02/01</b>	70	195	350	0,86		37	160	290	0,85		185	27	270	0,15
<b>26/04/01</b>	97	102	172	0,91		68	375	620	0,93		198	23	275	0,13
<b>P2</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]	<b>P3</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]	<b>P4</b>	Ca <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	[Na <sup>+</sup> ] / [Cl <sup>-</sup> ]
<b>5/10/00</b>	176	23	265	0,13		126	15	120	0,19		124	17	71	0,37
<b>24/11/00</b>	192	15	285	0,08		145	13	139	0,14		127	13	37	0,54
<b>23/02/01</b>	205	16	290	0,08		150	13	135	0,15		128	10	38	0,40
<b>26/04/01</b>	197	25	285	0,13		148	12	130	0,14		132	8	26	0,47

**Tableau 5. Ions Caractéristiques des Fondants Routiers.**

Ces résultats indiquent une grande différence de teneur entre les concentrations maximales dans les fossés et dans la nappe. Le contraste est plus important pour le sodium que pour le chlore.



Examinons les réactions de l'eau avec les silicates identifiés dans la roche. Une première réaction concerne la substitution au sein des muscovites (ou illites) de l'aquifère:

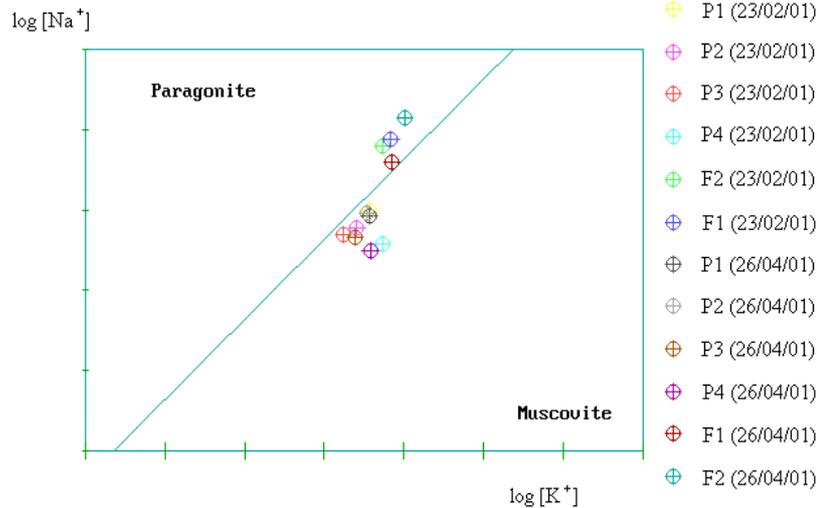


de constante d'équilibre

$$K_{\text{eq}} = [\text{K}^+]/[\text{Na}^+].$$

Comme le potentiel de Gibbs des minéraux considérés varie avec l'état cristallin de ces derniers, nous considérons l'état ordonné et désordonné de chacun des minéraux concernés.

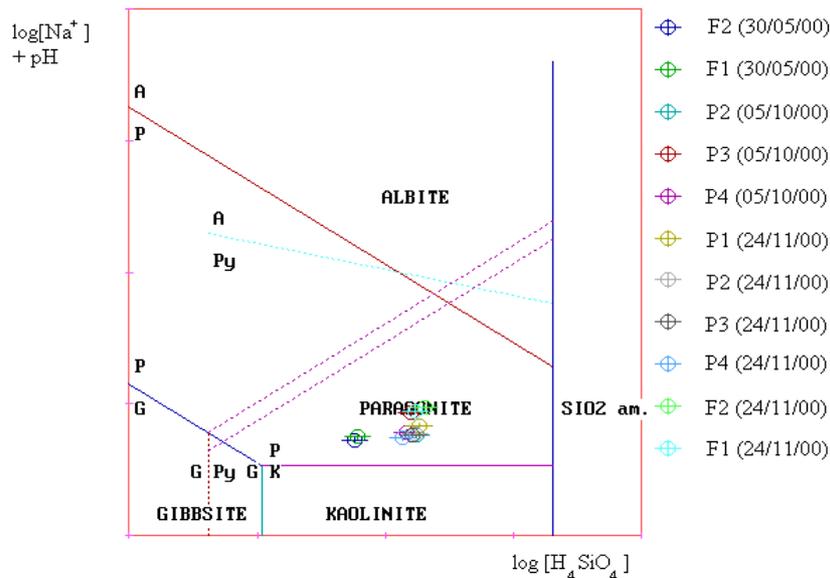
La figure 7 ci-dessous illustre la réaction la plus favorable.



**Figure 7 : Equilibre muscovite - paragonite**

En pratique, la muscovite désordonnée peut réduire la teneur en sodium de l'eau pour des concentrations de  $\text{Na}^+$  supérieures à vingt-cinq fois la concentration en  $\text{K}^+$ . Ce processus est donc thermodynamiquement possible pour les eaux de ruissellement les plus concentrées (après épandage), mais ne peut être actif au sein de l'aquifère.

Par contre, la transformation de la kaolinite en paragonite est possible sous l'effet de toutes les eaux analysées comme le montre la figure 8 ci-dessous obtenue par le modèle ETDE (Laurent E. 1987) appliqué à l'équilibre des silicates de sodium.



**Figure 8 : Equilibre des silicates de sodium**

Tous les points représentatifs des eaux du site de Couvin se trouvent dans le domaine de stabilité de la paragonite. La transformation de kaolinite, et accessoirement de feldspath, en paragonite peut diminuer les teneurs de  $\text{Na}^+$  de l'eau.

Notons que dans le cas du site de Spa, Kramm (1982) avait déjà signalé la présence de paragonite dans les roches du massif de Stavelot.

La réaction avec les eaux carbogazeuses avait été montrée dès 1987 (Laurent E. 1987) et plus particulièrement pour le site de Chevron (Laurent E. et Wollast R. 1987).

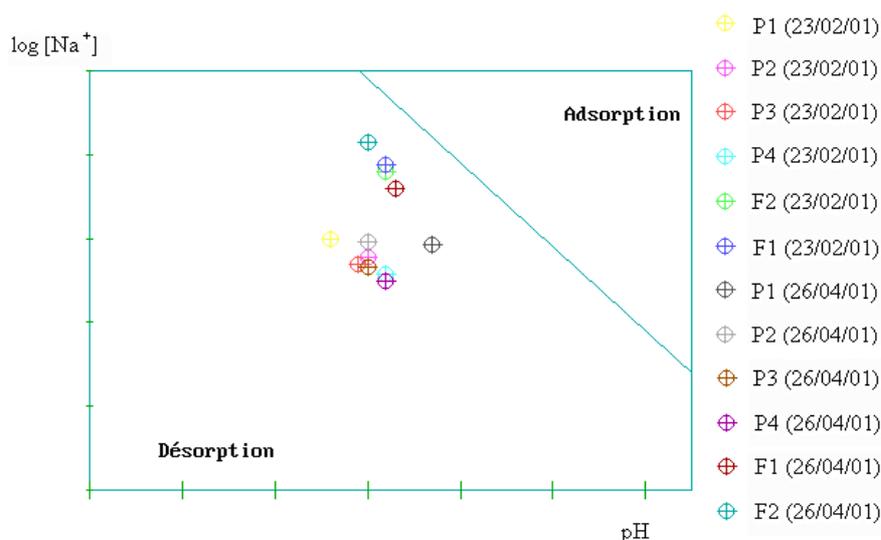
En conclusion, la présence de kaolinite dans les roches des deux sites contribue à la diminution de  $\text{Na}^+$  et explique donc au moins partiellement l'évolution du rapport  $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ .

Le pouvoir d'adsorption des métaux dissous dans l'eau par les hydroxydes de fer et manganèse désordonnés est connu dans la genèse des nodules de manganèses et en traitement de l'eau par filtration. Lan Smiths S. et Jaffe P.R.(1988) introduisent l'ion  $\text{Na}^+$  dans la modélisation du transport et de l'adsorption des ions métalliques en traces dans la zone saturée du sol. L'adsorption sur les minéraux désorganisés du manganèse peut s'écrire:



A partir d'une adsorption à l'équilibre, on peut représenter la réaction par la figure 9.

On constate, pour les eaux de fossés et de la nappe, que les concentrations en  $\text{Na}^+$  sont insuffisantes pour que ce phénomène puisse jouer. En pratique, il faut des teneurs de l'ordre de 350 mg/l pour un pH d'environ 7,7 pour qu'il y ait adsorption. Ce mécanisme ne peut fonctionner que pour les eaux de ruissellement les plus concentrées.



**Figure 9 : Adsorption - Désorption**

En conclusion, le comportement différent de l'ion  $\text{Na}^+$  par rapport à l'ion  $\text{Cl}^-$  s'explique par les réactions de substitution entre l'eau et les roches de l'aquifères. Au sein de l'aquifère, la réaction kaolinite-paragonite semble primordiale. Pour des concentrations plus fortes, en particulier dans les eaux de ruissellement, la transformation muscovite-paragonite et l'adsorption sur les hydroxydes désordonnés de fer et manganèse peuvent contribuer à réduire la teneur en  $\text{Na}^+$  de l'eau.

## 6. Conclusions

L'évolution de l'ensemble des aquifères entre 1997 et 2000 est peu importante du point de vue des apports des fondants routiers. La situation générale reste bonne. Ponctuellement, quelques points marquent une croissance lente des chlorures mais quelques autres ont vu les teneurs des pics hivernaux décroître. Les seules pollutions très élevées restent liées à quelques rares sites d'activité industrielle.

Dans le site minéralier, les teneurs des eaux de surface et des eaux souterraines restent excellentes. Seuls les points en aval du dépôt de sel de Balmoral montrent des teneurs anormales lorsque la discipline de bâchage n'est pas respectée. La construction d'un bâtiment de couverture du dépôt éliminera définitivement ce problème. Un effort d'égouttage et d'épuration s'impose pour éliminer deux sites de rejet d'eaux usées.

Les valeurs du rapport des concentration  $[Na^+]/[Cl^-]$  nous ont fourni les indices d'un comportement différent des deux ions par rapport aux roches en place.

Les essais et les analyses sur le site autoroutier permettent d'étudier en détail le comportement des ions dans l'eau des fossés de collecte et de l'aquifère. L'ion  $Na^+$  est fortement réduit au cours de l'infiltration tandis que le  $Cl^-$  diminue surtout sous l'effet de la dispersion dans l'aquifère.

Les teneurs en  $Cl^-$  sont réduites d'un facteur 4 à 10 entre les puits P2 et P4 distants de 30 m, dans la direction perpendiculaire à la route. Les paramètres hydrogéologiques et de dispersion confirment le choix de ce site à titre de zone sensible. Les valeurs des transmissivités, des coefficients de dispersion et de la porosité dynamique du site ont été déterminées.

Les analyses minéralogiques permettent de mieux définir les roches de l'aquifère. Elles mettent en évidence les minéraux susceptibles de confirmer le comportement différent des ions  $Cl^-$  et  $Na^+$ . En particulier, les minéraux susceptibles d'intervenir dans les réactions chimiques de diminution du sodium ou de servir d'indice de ces réactions ont été identifiés.

Parmi celles-ci, nous distinguons celles qui n'interviennent que pour les concentrations élevées de celles qui ont encore lieu même après diminution partielle des teneurs.

Les réactions de l'ion bicarbonate  $HCO_3^-$  avec le sodium exigent des concentrations plus élevées que celles observées sur le terrain. Par contre, pour des teneurs de plus de 350 mg/l, l'adsorption sur les oxydes désorganisés de fer et manganèse peut contribuer à la diminution du sodium dissous dans l'eau des fossés.

La substitution de muscovite en paragonite contribue à la diminution en  $Na^+$  des eaux dont les teneurs sont supérieures à 25 fois celles en potassium. Le diagramme d'équilibre a confirmé la possibilité de réaction pour les fossés en période d'épandage. Par contre, cette réaction ne se déroule pas dans l'aquifère.

Enfin, la réaction kaolinite-paragonite est possible pour toutes les eaux analysées dans le site.

L'étude a donc identifié les mécanismes expliquant les comportements  $Na^+$  et  $Cl^-$ . De plus, elle permet déjà de donner quelques recommandations pour l'aménagement des sites :

- les surfaces de ruissellement et les fossés devront comporter des roches riches en minéraux réagissant avec l'eau pour diminuer la teneur en sodium de celle-ci. L'examen minéralogique des roches du site et des carrières environnantes guidera ce choix en fonction des équilibres étudiés.
- le fond des fossés et en particulier les zones d'infiltration de ceux-ci peuvent être garnis des mêmes roches.
- Le creusement des fossés ne devra pas enlever les couches peu perméables protégeant l'aquifère par filtration lente et par les réactions étudiées.

Enfin, un traitement de l'eau salée collectée avant les fossés devra s'inspirer des réactions étudiées et une station pilote de traitement naturel devrait faire l'objet de la prochaine étude des eaux du site autoroutier.