



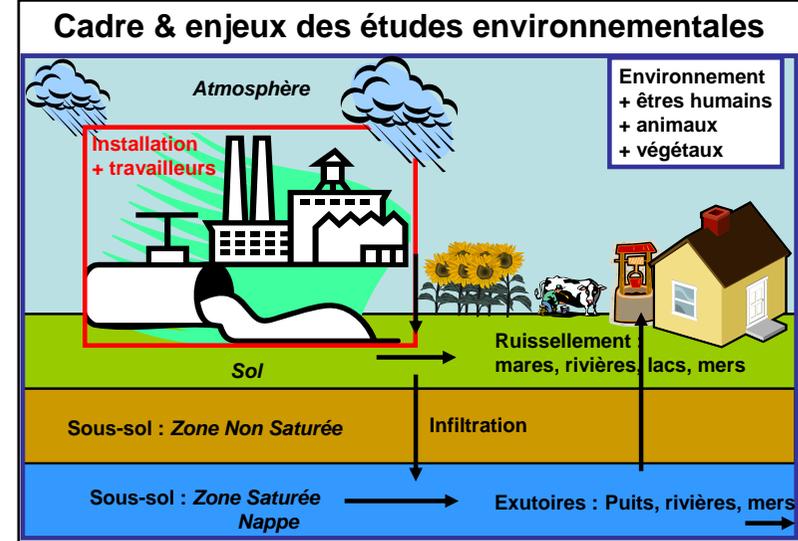
Master IPG Paris - Univ. Paris 7
IUP Génie de l'Environnement
"Génie de l'Environnement & Industrie"
"Géophysique de Surface et de Sub-surface"
+ autres composantes STEP
UE optionnelle



Stockage géologique des déchets. Pollutions des sols et du sous-sol : de la source à l'homme. Partie 2

Cours – Année 2007-2008

Éric Pili
Commissariat à l'Énergie Atomique
Laboratoire Hydrogéochimie et Études de Sites
Eric.Pili@cea.fr



En résumé :

- les pollutions résultent d'une contamination ;
- les sols sont des intégrateurs des contaminations, ils permettent généralement de remonter aux sources ;
- les eaux de surface et les eaux souterraines sont des vecteurs rapides pour les contaminants et des ressources indispensables pour l'homme ;
- les sols et la zone non saturée constituent la dernière barrière des pollutions avant atteinte de la ressource en eau ;
- Il existe de nombreuses catégories de polluants. Tous sont à traiter, sous toutes leurs formes.

=> Nécessité de savoir détecter et caractériser les contaminations et leurs proxies, sous toutes leurs formes, dans l'atmosphère, les sols, le sous-sol, et les nappes.

Les mesures sur site : le criblage

- Détecter / doser sur site tout ou partie des contaminants recherchés (sols, nappes) afin de cibler les zones de prélèvements pour les échantillons de laboratoire.
- Choix d'une technique de criblage selon :
 - existence, coût,
 - durée d'analyse sur le terrain,
 - destructions / interférences
 - limites de détections
- Criblage vrai ou prélèvements dirigés.

Méthodes de criblage des sols

Méthode	Application	Avantages & inconvénients
Fluorescence X	Détection / dosage métaux	+ Rapide, avec ou sans prélèvement, - Nécessite le contact, - Source de rayons X
Détecteurs à ionisation	Détection / dosage COV, composés organiques et inorganiques	+ Rapide - Nécessite un prélèvement (canne, adsorbant)
Chromatographie gaz	COV, composés organiques et inorganiques	+ Identification de composés spécifiques, - Nécessite un prélèvement
Kits d'analyse (colorimétrie, antigène-anticorps)	Détection HAP, TNT	+ Léger, - Nbre limité de ppts détectés
Détecteurs de radiations	Contaminations radioactives	+ Très rapide, + Parfois sélectif $\gamma > \alpha \gg \beta$ + Mesure déportée (γ) - Pas tous les RN détectables

Modifié d'après MATE, 2000

Détecter les gaz des sols : compétition émission - piègeage

Caractéristiques de quelques COV

Nom	Point d'ébullition °C (760 mm Hg) ¹⁾	Pression de vapeur mm Hg (20 °C) ²⁾	Constante de Henry (K _H) Pa.m ³ .mol ⁻¹ (25 °C) ³⁾
n-hexane	68,7	120,88	74
benzène	80,1	74,88	0,22
cyclohexane	80,7	77,72	7,9
heptane	98,4	35,45	83
triméthylpentane	109,8	24,60	—
toluène	110,6	21,64	0,67
n-octane	125,0	10,48	131

D'après normalisation XP X31-613, 1997

- Plus le point d'ébullition est bas et la pression de vapeur élevée, plus le COV est vaporisable,
- Plus la constante de Henry est faible, plus les COV sont solubles dans l'eau, d'où une rétention par le sol et une diminution de leur teneur dans la phase gazeuse.
- Cas similaire de l'émanation du radon :
 - sol sec ou sol saturé : faible émanation,
 - sol mouillé non saturé : forte émanation

Pourquoi ?

Méthodes géophysiques

« Elles caractérisent le contenant plus que le contenu »

- Recherche de sources de pollutions enterrées : canalisations, fûts de déchets, fosses d'enfouissement
- Recherche de fuite, contrôle d'homogénéité de structures
- Détections de contamination en zones non saturée et saturée

Groupe de méthodes	Paramètre physique étudié	Champ mesuré
Gravimétrie	Densité	Pesanteur
Sismique	Vitesse et/ou impédance acoustique des ondes mécaniques (vitesse * densité)	Temps de trajet et amplitude des signaux transmis
Electrique en courant continu	Résistivité	Différence de potentiel
Magnétisme	Susceptibilité magnétique	Champ magnétique terrestre
Electromagnétisme	Résistivité et/ou constante diélectrique	Champ magnétique Champ électrique
Radioactivité	Radioactivité des roches	Nombre d'événements

D'après MATE, 2000

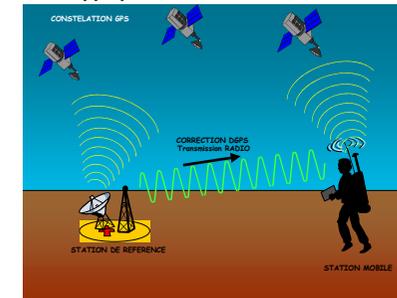
Cartographier une contamination :

- détecter ou mesurer une substance ou un paramètre
- associer ses coordonnées géographiques à chaque point de mesure
- répéter l'opération dans un temps acceptable

Exemple de chaîne détecteur-centrale d'acquisition-localisation géographique : le système SOCRATE développé par l'IRSN



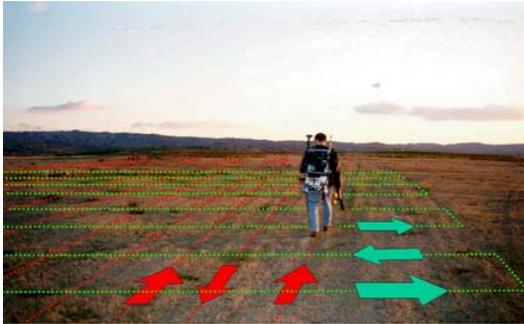
Sonde SAPHYMO MPP2



Principe de fonctionnement du GPS en mode différentiel temps réel.

D'après P.Richon, comm. pers., 2004

Réalisation d'une cartographie par mesure in-situ



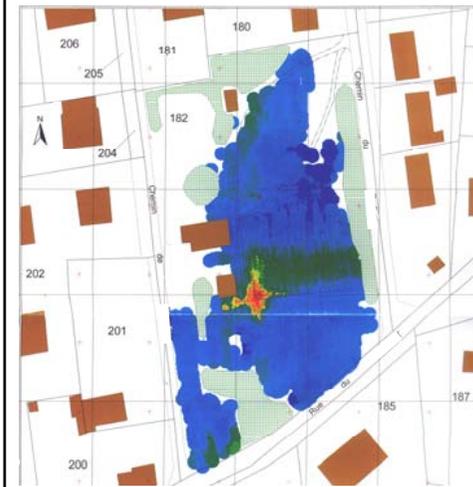
D'après P. Richon, comm. pers., 2004

Cartographie d'un site par carroyage croisé avec un espacement de 1 m, une vitesse 5 km.h⁻¹ et un pas d'enregistrement de 1 seconde. Sonde Saphymo MPP2 tenue à 50 cm du sol.

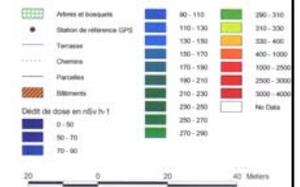
Peut-on toujours se permettre d'effectuer un carroyage (mesure ou échantillonnage systématique) ?

=> adapter les géométries de couverture aux objectifs et aux moyens

Cartographie de la contamination radioactive d'un sol



Exemple de cartographie pédestre du débit de dose. Système SOCRATE, développé par l'IRSN, à partir d'une sonde Saphymo MPP2 tenue à 50 cm du sol et d'un GPS différentiel.



D'après P. Richon, comm. pers., 2004

Fluorescence X portable de terrain (FP-XRF)

- Exemple de l'instrument NITON XL 700
- Source de rayons X : tube
- Utilisation in-situ ou déportée sur prélèvement (voir photos)
- Préparation des échantillons : aucune (in-situ) ou séchage, broyage, compaction (prélèvements)
- LD (selon les éléments) : 5-350 ppm
- Précision (selon les éléments) : 10-40 % in-situ, 1-30 % sur prélèvements
- Cadence : 60 sec./mesure (annoncé) 100 points / jour (testé)



Élément	Limites de détection en ppm (comptage 60 secondes sur prélèvement)		
	Matrice quartz	Matrice sol SRM	Anciennes Valeurs de Constat d'Impact (MATE, 2000)
Cr	250	350	400
Mn	150	250	
Fe	150	250	
Co	30	200	240
Ni	60	100	140
Cu	100	125	600
Zn	40	75	720
As	10	15	20
Se	10	15	80
Pb	12	20	400
Hg	12	20	20
Rb	5	15	
Sr	15	25	



Source : www.niton.com

Utilisation des normes pour la détection des pollutions

normalisation française

ISSN 0335-3031
FD X 31-610
Novembre 1997

Indice de classement : X 31-610

ICS : 13.090

Qualité du sol

Méthode de détermination semi-quantitative des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols

Guide de sélection et d'utilisation des kits de dosage immunoenzymatiques

normalisation française

ISSN 0335-3031
XP X 31-612
Novembre 1997

Indice de classement : X 31-612

ICS : 13.090

Qualité du sol

Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions

Mesure in situ des COV dans les gaz du sol et du sous-sol d'un site

normalisation française

ISSN 0335-3031
FA 104390
XP X 31-613
Novembre 1997

Indice de classement : X 31-613

ICS : 13.090

Qualité des sols

Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions

Prélèvement dynamique des gaz dans les sols en vue d'un criblage de terrain

normalisation française

ISSN 0335-3031
FD X 31-615
Décembre 2000

Indice de classement : X 31-615

ICS : 13.060.10

Qualité du sol

Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions

Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage

Voir www.afnor.fr et MATE, 2003

Échantillonnage : les étapes

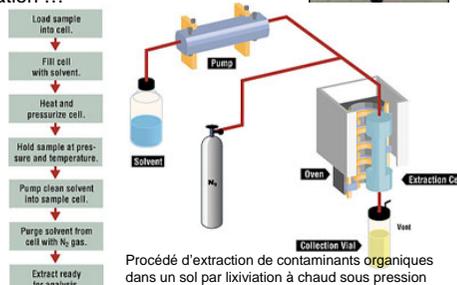
- **Stratégie**
 - Compartiments cibles, substances cibles,
 - Cartographie, repérage,
 - Matériels et méthodes,
 - Planification, autorisations.
- **Processus**
 - Prélèvement,
 - Mesures in-situ couplées,
 - Traitements & mesures non différés,
 - Conditionnement,
 - Conservation.
- **Exploitation**
 - Analyses au laboratoire, y compris rapport d'essai,
 - Utilisation pour la problématique,
 - Mise à disposition d'autres problématiques.

Échantillonnage : les contraintes

- Le prélèvement doit être :
 - représentatif,
 - reproductible,
 - décrit (protocole, carnet de terrain)
- L'échantillon doit être :
 - intègre,
 - référencé de façon unique,
 - décrit (nature, origine, caractéristiques, lieu, date ...)
 - capable de fournir la matière aux analyses souhaitées,
 - exploité
 - conservé, archivé.

Échantillonnage des sols et du sous-sol

- **Solides** : sols, zone non saturée, zone saturée
 - Pelles, tarières, carottiers, tranchées, tunnels ...
- **Eaux interstitielles** : sols, zone non saturée
 - Prélèvement in-situ : *bougies poreuses*
 - Récupération après traitement au laboratoire : pressage, distillation, *lixiviation*, centrifugation ...
- **Eaux de nappe** :
 - Prélèvement direct : piézomètre, puits, forage AEP
 - Prélèvement périphériques : utilisation des sources, rivières



Utilisation des normes pour l'échantillonnage des sols

norme française	NF X 31-003 Décembre 1998 Indice de classement : X 31-003	norme française	NF ISO 11074-2 Mars 1999 Indice de classement : X 31-002-2
	ICS : 13.080.01		ICS : 01.040.13 ; 13.080.01
Qualité du sol		Qualité du sol	
Description du sol		Vocabulaire	Partie 2 : Termes et définitions relatifs à l'échantillonnage
norme française	NF ISO 10381-1 Mai 2003 Indice de classement : X 31-008-1	norme française	NF ISO 10381-2 Mars 2003 Indice de classement : X 31-008-2
	ICS : 13.080.05		ICS : 13.080.05
Qualité du sol		Qualité du sol	
Échantillonnage	Partie 1 : Lignes directrices pour l'établissement des programmes d'échantillonnage	Échantillonnage	Partie 2 : Lignes directrices pour les techniques d'échantillonnage
norme française	NF ISO 11464 Décembre 1994 Indice de classement : X 31-412	norme française	NF M 60-790-2 Juillet 1999 Indice de classement : M 60-790-2
	ICS : 13.080.05		ICS : 13.280 ; 17.240 ; 27.120.01
Qualité du sol		Energie nucléaire	
Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques		Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Sol	
		Partie 2 : Guide pour la sélection des zones de prélèvement, l'échantillonnage, le transport et la conservation des échantillons de sol	

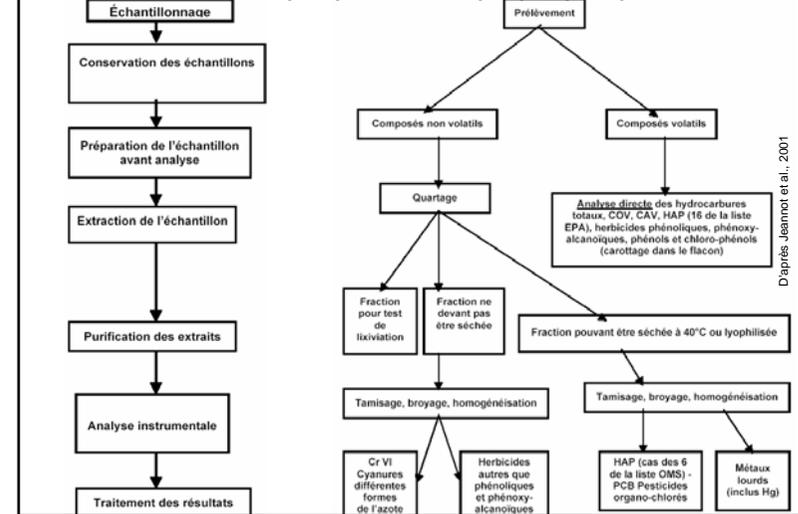
Voir www.afnor.fr et Pottevin et Thomas, 2003

Utilisation des normes pour l'échantillonnage des eaux

<p>norme européenne norme française</p> <p>ISO 5667-1 NF EN 25667-1 ISO 5667-1 Décembre 1993 Indice de classement : T 90-511</p> <p>Qualité de l'eau Échantillonnage Partie 1 : Guide général pour l'établissement des programmes d'échantillonnage</p>	<p>norme européenne norme française</p> <p>ISO 5667-2 NF EN 25667-2 ISO 5667-2 Décembre 1993 Indice de classement : T 90-512</p> <p>Qualité de l'eau Échantillonnage Partie 2 : Guide général sur les techniques d'échantillonnage</p>
<p>norme européenne norme française</p> <p>ISO 5667-3 NF EN ISO 5667-3 Juin 2004 Indice de classement : T 90-513 ICS : 13.060.45</p> <p>Qualité de l'eau Échantillonnage Partie 3 : Lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau</p>	<p>Norme internationale ISO 5667-11 mars 1993</p> <p>Qualité de l'eau. Échantillonnage. Partie 11 : guide général pour l'échantillonnage des eaux souterraines.</p>

Voir www.afnor.fr et MATE, 2003

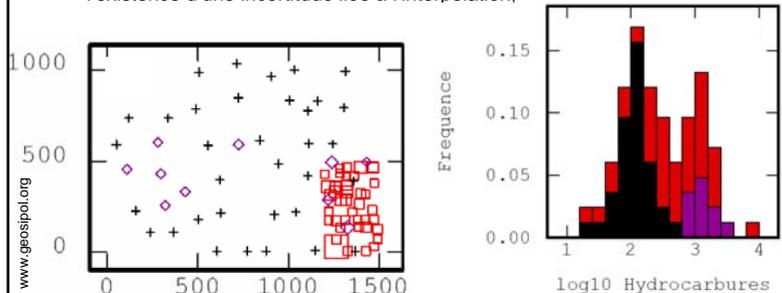
Analyses au laboratoire après prélèvement : quelques principes & méthodes



Comment passer des mesures à la cartographie d'un contaminant ?

Réaliser une carte les yeux fermés néglige :

- les différences d'origine et de qualité des mesures,
- la signification des mesures anormales,
- le recours à une méthode d'interpolation respectant la structure des données,
- la prise en compte des incertitudes de mesure,
- l'existence d'une incertitude liée à l'interpolation.

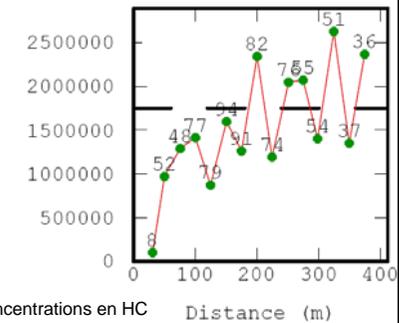


Apport de la géostatistique

1/2

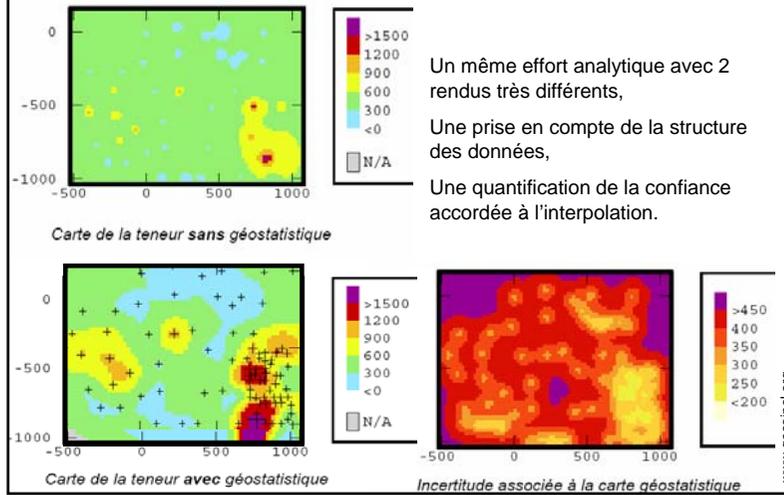
- Analyse exploratoire des données,
- Détection des mesures anormales,
- Détermination de la structure des données : **variogramme**
- Interpolation par **kriégage**
- Prise en compte des incertitudes de mesure,
- Calcul d'une incertitude liée à l'interpolation par simulations géostatistiques.

Variogramme expérimental des concentrations en HC



Apport de la géostatistique

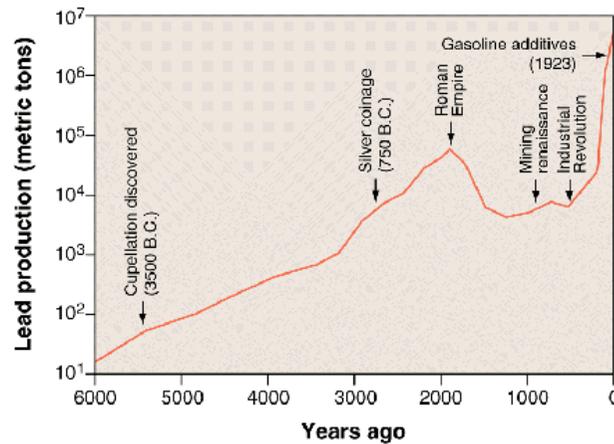
2/2



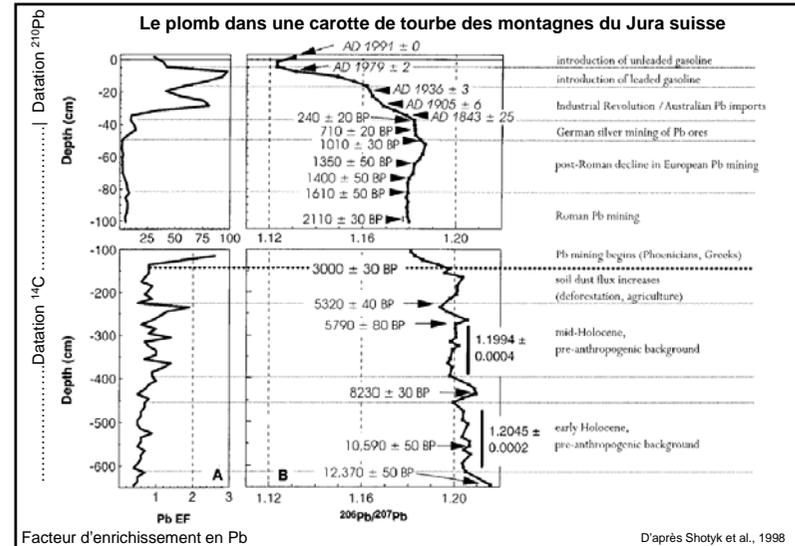
Reconnaître un polluant

- Composés artificiels,
- Particularités moléculaires,
- Éléments traces associés au polluant,
- Composition et rapports isotopiques
- Équilibre séculaire,
- Isotopes radioactifs / isotopes stables.

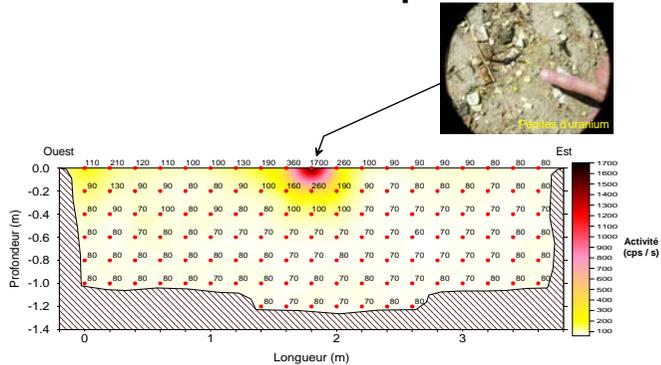
Extraction minière du plomb au cours des âges



Progress in lead. Logarithmic plot of historical lead production over time, from Nriagu (1998)



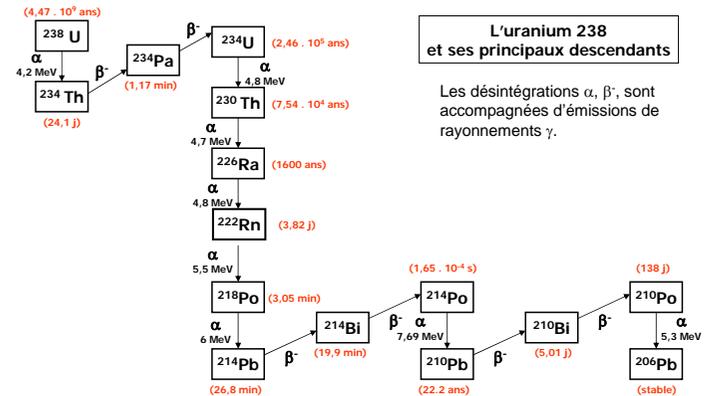
Distribution 2D verticale d'une contamination surfacique à l'uranium



Méthode : Sonde gamma au contact sur paroi de tranchée après repérage de contaminant au sol

D'après A. Podembski, comm. pers., 2004

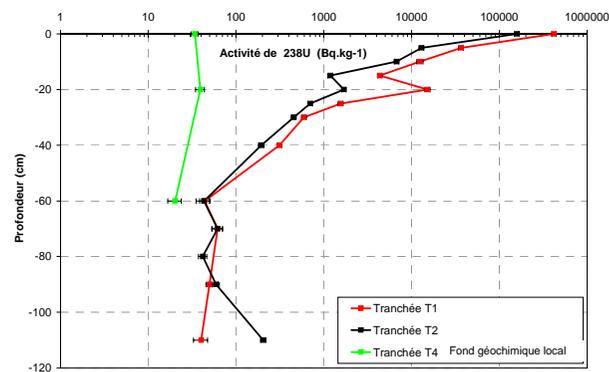
L'uranium 238 et ses principaux descendants



Les désintégrations α , β , sont accompagnées d'émissions de rayonnements γ .

D'après Granier et Le Petit, 2002

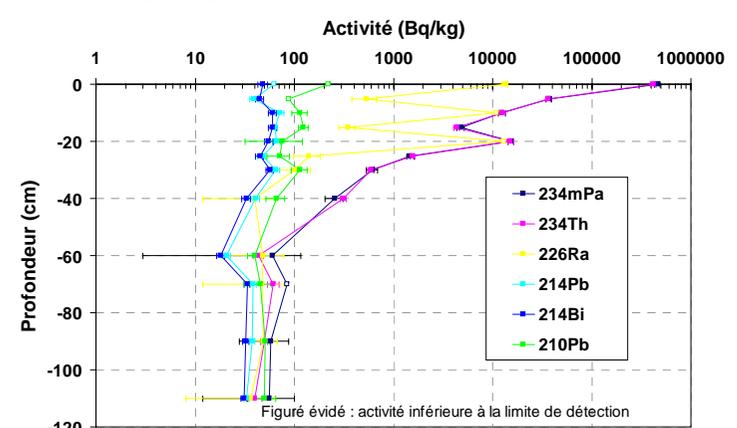
Caractérisation d'une contamination U : utilisation d'un référentiel externe



Méthode : spectrométrie gamma GeHP de laboratoire sur échantillons (séchés, broyés, comptage 4000 minutes) prélevés sur la paroi de tranchée le long de la verticale du maximum de signal. Les pépites présentes au sol sont soustraites des échantillons.

D'après A. Podembski, comm. pers., 2004

Caractérisation d'une contamination U : utilisation d'un référentiel interne



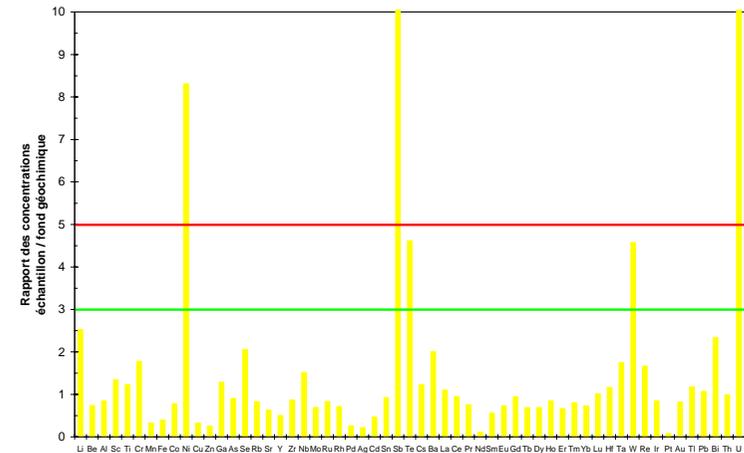
Figuré évidé : activité inférieure à la limite de détection

D'après A. Podembski, comm. pers., 2004

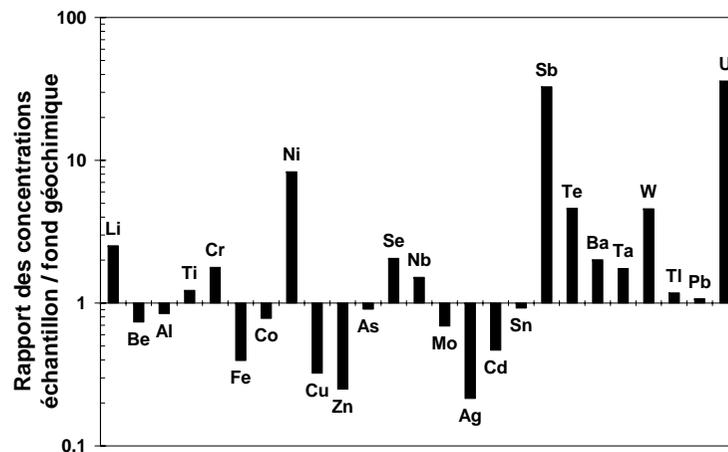
Exemple : 1/3 Recherche de contaminants dans un sol

- Contexte :
 - Installation industrielle d'usinage de métaux
 - Prélèvement de sol à proximité d'une cheminée d'extraction des poussières
- Référentiels
 - Citer et commenter les référentiels utilisables
- Résultats
 - Commenter les 2 graphes de rendu de résultats suivants

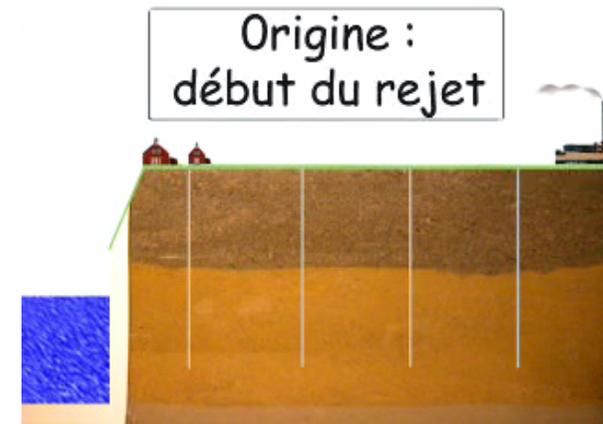
Recherche de contaminants dans un sol 2/3 Rendu des résultats



Recherche de contaminants dans un sol 3/3 Rendu des résultats

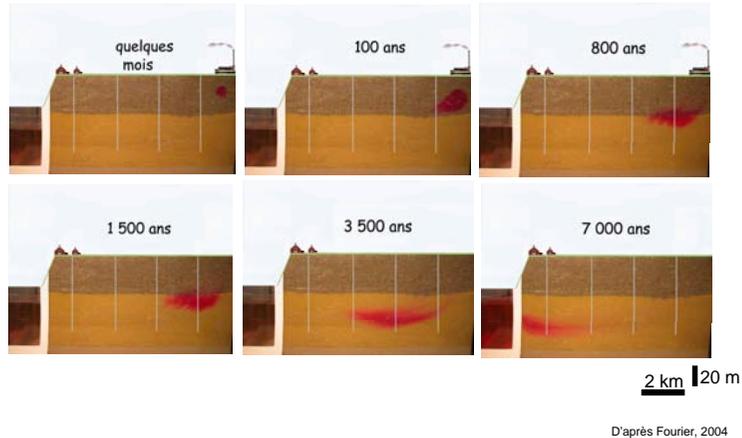


Migration d'un contaminant dans un aquifère : le film.



Film réalisé à partir de 100 prises de vue d'une expérience de traçage d'une durée de 5h réalisée en laboratoire, avec dimensionnement du modèle réduit (maquette de 40 cm de long, vitesse et gradient forts) à la réalité (longueur 10 km, vitesse et gradient faibles), pour une contamination en zone non saturée par une solution aqueuse (rhodamine / plomb)

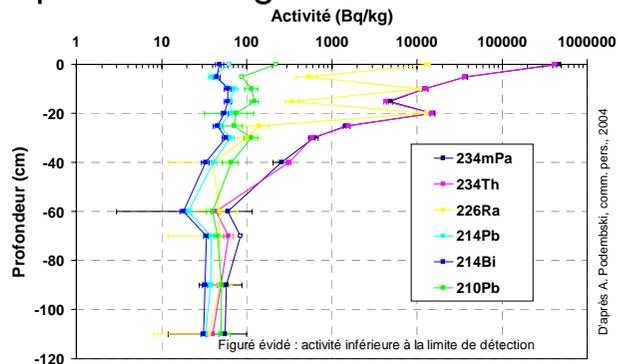
Si vous avez raté le film ...



Migration : Vocabulaire & concepts

- Sol, zone non saturée, insaturée ou vadose, zone saturée ;
- Aquifère, imperméable ;
- Nappe libre, nappe captive, base, toit, piézométrie ;
- Écoulement, gradient, charge, potentiels, flux ;
- Migration ; transport non réactif, transport réactif ;
- Advection, dispersion, diffusion
- Spéciation ;
- Modélisation géochimique ;
- Modélisation hydrogéologique ;
- Modélisation couplée, couplage géochimie-transport ;
- Calibration, validation, intercomparaison, benchmark.

Des profils de migration aux mécanismes ?



Quel mécanisme pour expliquer ce profil sachant que l'uranium est également détecté dans la nappe à 10 m de profondeur ?

- possibilité d'un court-circuit hydrogéologique ?
- possibilité d'un court circuit géochimique ?
- résolution des mesures de ce profil ?

Distribution des espèces dominantes de contaminants à 3 valeurs de pH pour des eaux souterraines oxydantes

Element	pH 3		pH 7		pH 10	
	Species	%	Species	%	Species	%
^3H	HTO	100	HTO	100	HTO	100
U 0.1 $\mu\text{g/l}$	UO_2F^+	62	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	58	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	63
	UO_2^{2+}	31	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$	19	$\text{UO}_2(\text{OH})_2$	31
	$\text{UO}_2\text{F}_2(\text{aq})$	4	$\text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$	17	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	4
U 1,000 $\mu\text{g/l}$	UO_2F^+	61	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	41	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	62
	UO_2^{2+}	33	$(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	30	$\text{UO}_2(\text{OH})_2$	32
	$\text{UO}_2\text{F}_2(\text{aq})$	4	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$	13	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^0$	4
			$\text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$	12		
Pu	PuF_3^{2+}	69	$\text{Pu}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^0$	94	$\text{Pu}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^0$	90
	PuO_2^+	24	$\text{Pu}(\text{OH})_2(\text{aq})$	5	$\text{Pu}(\text{OH})_2(\text{aq})$	10
	Pu^{3+}	5				
Rn	Rn^0	100	Rn^0	100	Rn^0	100
Sr	Sr^{2+}	99	Sr^{2+}	99	Sr^{2+}	86
					$\text{SrCO}_3(\text{aq})$	12

Adapté de EPA, 1999

Sélection de propriétés chimiques et de transport de contaminants.

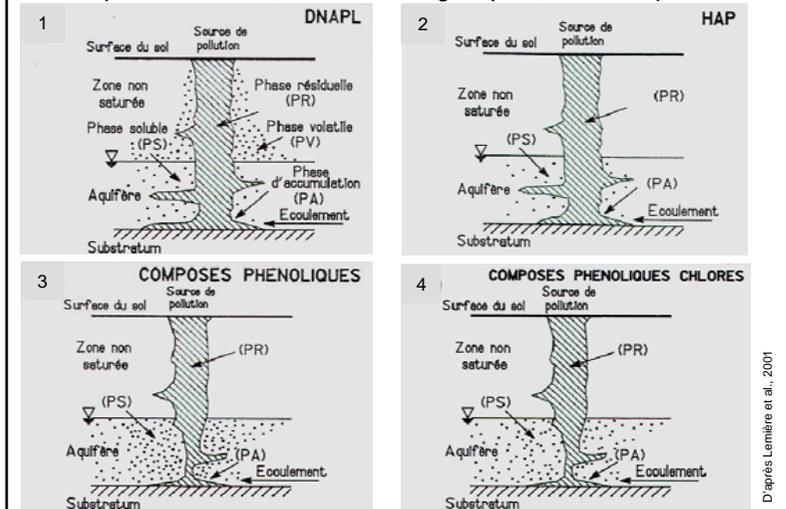
Element	Radio-nuclide	Primary Species at pH 7 and Oxidizing Conditions			Redox Sensitive	Transport Through Soils at pH 7	
		Cationic	Anionic	Neutral		Not Retarded	Retarded
³ H	x			x		x	
U	x		x	x	x		x
Pu	x		x	x	x		x
Rn	x			x		x	
Sr	x	x					x

Sélection des paramètres les plus importants, concernant les phases aqueuses et solides, affectant la sorption des contaminants.

Element	Paramètres importants affectant la sorption des contaminants
³ H	Aucun
U	[Oxydes d'Aluminium ou de Fer], [Carbonate, Fluorure, Sulfate, Phosphate], [Argiles], [Matière Organique], pH, Redox, [U]
Pu	[Oxydes d'Aluminium ou de Fer], [Carbonate, Fluorure, Sulfate, Phosphate], [Argiles], [Matière Organique], pH, Redox
Rn	Aucun
Sr	Capacité d'Echange Cationique, [Calcium], [Carbonate], pH, [Strontium Stable]

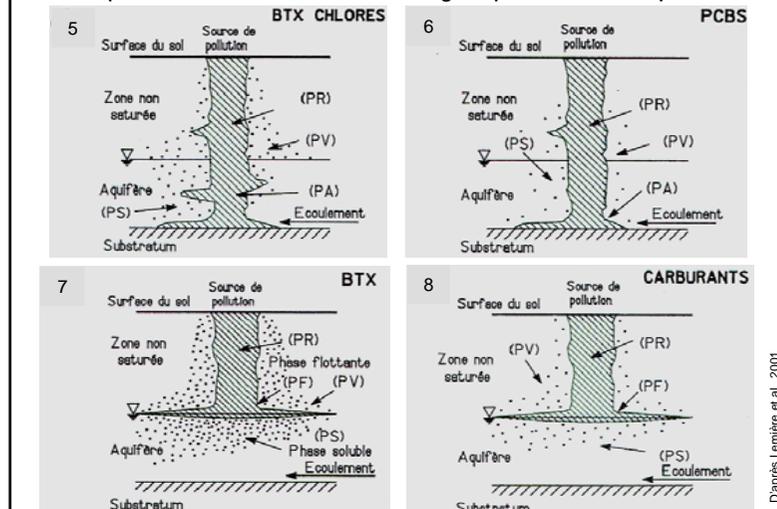
Adapté de EPA, 1989

Comportement des contaminants organiques dans un aquifère 1/2



D'après Lemièrre et al., 2001

Comportement des contaminants organiques dans un aquifère 2/2



D'après Lemièrre et al., 2001

Comportement des contaminants : propriétés intrinsèques 1/2

Critère de comportement	Grandeurs caractéristiques
Capacité à se solubiliser	Solubilité dans l'eau
Écoulement vertical	Densité du liquide par rapport à l'eau
Capacité à se volatiliser	Tension de vapeur, Température d'ébullition, Constante de Henry
Migration vertical des vapeurs	Densité des vapeurs par rapport à l'air
Affinité avec l'eau	Coefficient de partage octanol-eau (Kow)
Capacité à être piégé (sur la matière organique, les solides, les colloïdes)	Coefficient de partage eau-carbone organique (Koc), Coefficient de partage liquide-solide (Kd)
Capacité à disparaître : • décroissance radioactive, • réactions bio-géochimiques	Temps de demi-vie • période radioactive • temps de demi-vie, mais aussi : potentiel redox, nature des bactéries, présence de nutriments ...

Modifié d'après Lemièrre et al., 2001

Comportement des contaminants : propriétés du milieu de transfert 2/2

Critère de comportement	Grandeurs caractéristiques
Connectivité du milieu poreux	Porosité totale, porosité efficace
Existence de fractures	Porosité de fracture
Capacité à chenaliser les flux	Anisotropie
Intensité de l'infiltration	Pluie efficace, ruissellement, évapotranspiration
Capacité à transmettre les fluides	Perméabilité
Capacité à retenir l'eau	Courbes de rétention, frange capillaire
Capacité à ennoyer/dénoyer une étendue de zone non saturée	Battement de nappe
Capacité à former & libérer des colloïdes	Nature du milieu, force ionique

Remédiation

- Laver l'eau (cleanup of contaminated groundwater) : « rendre l'eau potable », nettoyer les sols : < 20 ans d'efforts et de REX.
- Des efforts importants en recherche et processus industriels, pour les sols et les nappes.
- Un principe encore peu accepté : « Mythe de Sisyphe, tonneau des Danaïdes », « qui paie pour qui ? »
- Peu de sites traités, un succès très limité.
- Des coûts exorbitants (USA, \$ 9 billions in 1996).
- Repenser les remédiations, tant sur le plan des objectifs que de leurs durées.
- Émergence de l'Atténuation Naturelle Contrôlée.

Atténuation

- Mécanismes :
 - Abaisser les concentrations :
 - Dilution, dispersion, volatilisation
 - Immobiliser ou rendre moins toxique :
 - sorption, précipitation, spéciation
 - Faire ou laisser disparaître :
 - décroissance radioactive : cas des RN
 - dégradations chimique et biologique (métabolisme, photolyse, catalyse ...) : cas des substances organiques.
- Suivi (monitoring)
 - Paramètres de contrôle (dans le temps et l'espace) :
 - décroissance des concentrations en produits initiaux,
 - croissance des concentrations en produits secondaires,
 - DCO, paramètres physico-chimiques de la spéciation.
 - Mobilité & Toxicité des produits secondaires

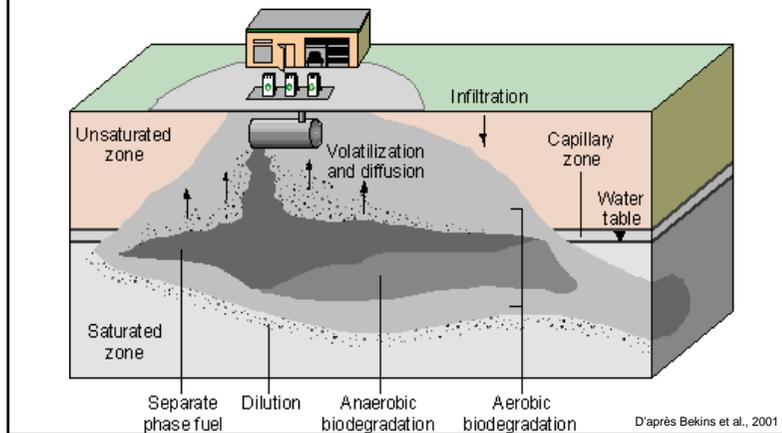
Périodes de quelques solvants chlorés soumis à des dégradations physico-chimiques ou biologiques dans les nappes

Composé	Dégradation	Demi-vie	Produit
Dichlorométhane	Phys-chim. Bio.	704 ans 300 jours	
Trichlorométhane	Phys-chim.	1800-3500 ans	
Chloroéthane	Phys-chim.	0,12 an	Éthanol
Trichloroéthylène	Phys-chim.	1,3 x 10 ⁶ ans	Méthane
1,1,1-Trichloroéthane	Phys-chim. Bio.	400 jours 30 jours	Acide acétique
1,1,2-Trichloroéthane	Phys-chim.	140 ans	1,1-DCE
1,1-Dichloroéthane	Phys-chim.	61 ans	

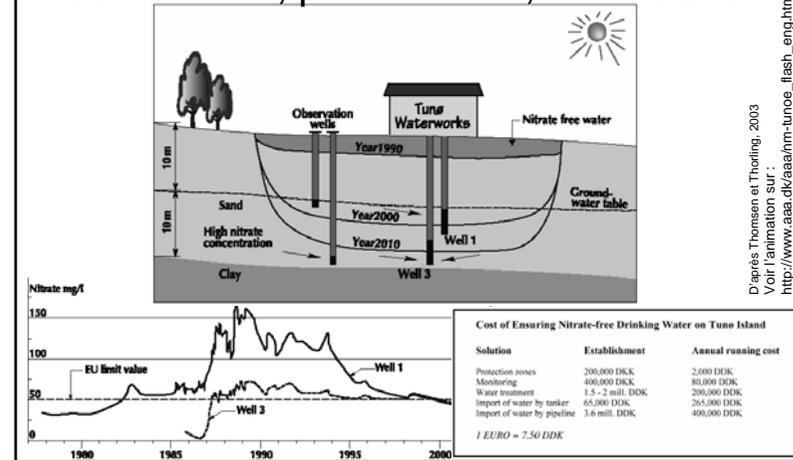
Exemple de chaîne de biodégradation (déhalogénéation réductive) :
Trichloroéthylène -> Dichloroéthylène -> Chlorure de vinyle -> Ethylène -> Méthane

Modifié d'après Novak et al., 2003

Atténuation naturelle : illustration des mécanismes en jeu pour les hydrocarbures



Protection d'un captage d'eau : mécanisme, performance, économies



D'après Thomsen et Thorling, 2003
Voir l'animation sur :
http://www.aaa.dk/aaa/nm-tunce_flash_eng.html

Bibliographie

- Bekins, B., B.E. Rittmann, et J.A. MacDonald, Natural attenuation strategy for groundwater cleanup focuses on demonstrating cause and effect, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 82 (5), 53, 57-58, 2001.
- EPA. (1999) Understanding variation in partition coefficient, Kd values. Volume II: Review of geochemistry and available Kd values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium (3H), and Uranium, pp. 341. U.S. Environmental Protection Agency.
- Fourier, J., Réalisation d'une maquette illustrant les études de sites pollués, rapport de stage de DESS Pollution Chimique & Environnement, Université de Paris-Sud, Orsay, réalisé au CEA sous la direction d'Éric Pili, pp. 84, 2004.
- Granier, G., et G. Le Petit, *Spectrométrie gamma appliquée aux échantillons de l'environnement (Dossier de recommandations pour l'optimisation des mesures)*, 238 pp., Lavoisier, 2002.
- Jeannot, R., B. Lemièrre, S. Chiron, F. Augustin, et D. Darmendrail, Guide Méthodologique pour l'Analyse des Sols Pollués, document BRGM 298, pp. 84, éditions BRGM, 2001.
- Lemièrre, B., J.J. Seguin, C. Le Guern, D. Guyonnet, P. Baranger, D. Darmendrail, et P. Conil, Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Évaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau, pp. 121,

Bibliographie

- MATE, Classeur Gestion des Sites (Potentiellement) Pollués - Diagnostic Initial et Évaluation Simplifiée des Risques, BRGM Éditions, 2000.
- MATE, Guide méthodologique pour la mise en place et l'utilisation d'un réseau de forages permettant d'évaluer la qualité de l'eau souterraine au droit ou à proximité d'un site (potentiellement pollué). Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, pp. 61, 2003.
- Novak, C., J.R. Mossman, et A. Saada, État des connaissances sur l'atténuation naturelle: mécanismes et mise en œuvre, rapport BRGM/RP-51960-FR, pp. 97, 2003.
- Nriagu J. O. (1998) PALEOENVIRONMENTAL RESEARCH: Enhanced: Tales Told in Lead 10.1126/science.281.5383.1622. *Science* 281(5383), 1622-1623.
- Pottevin, M., et L. Thomas, Inventaire des normes sur la qualité des sols. Description et domaines d'application, pp. 57, AFNOR, 2003.
- Shotyk, W., D. Weiss, P.G. Appleby, A.K. Cheburkin, R. Frei, M. Gloor, J.D. Kramers, S. Reese, et W.O. Van der Knaap, History of atmospheric lead deposition since 12,370 C-14 yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland, *Science*, 281 (5383), 1635-1640, 1998.
- Thomsen, R., and L. Thorling, Use of protection zones and land management restore contaminated groundwater in Denmark, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 84 (7), 64-65, 2003.