

LA METHODE D'EXPLORATION GEOBACTERIENNE : UN OUTIL APPLIQUE A LA PROSPECTION DE MINERALISATIONS AURIFERES D'ARGENTINE ET DU MEXIQUE

Léon DEJONGHE^{1,2} & Alain MELCHIOR¹

ABSTRACT. The geobacterial exploration method applied to prospecting of gold in Argentina and Mexico. The geobacterial method is based on the identification and quantification of *Bacillus cereus* bacteria occurring in soils, the abundance of which is associated with metals concentrations (especially gold). Its validity has been tested on auriferous deposits situated in Argentina and Mexico. The limits and potentialities of this technique are discussed. Simplicity, cheapness and quick results are the main trumps. However, low reproducibility and frequent spatial intervals between *Bacillus* peaks and high metal peaks are disadvantages compared to classical geochemical analysis. The geobacterial method appears to be of maximum effectiveness at the stage of regional exploration, especially in countries where the costs of labour are low.

KEYWORDS: *Bacillus cereus*, gold, base metals, soil geochemistry, geobacterial method, Argentina, Mexico.

RESUME. La méthode d'exploration géobactérienne est basée sur l'utilisation de bactéries appartenant au genre *Bacillus*, présentes dans les sols, dont l'abondance est en corrélation avec la teneur en certains métaux dont l'or. Elle a été testée sur des sites aurifères situés en Argentine et au Mexique. Le présent travail présente les limites et les potentialités de cette technique. Simplicité, faible coût de revient et rapidité d'obtention des résultats en sont les principaux atouts. Néanmoins, par rapport à une prospection géochimique classique en sols, elle présente une plus faible reproductibilité et les pics bactériens sont souvent décalés par rapport aux pics en métaux. Il s'agit donc d'un outil qui trouve sa place lors de campagnes de prospection à l'échelle régionale, dans des pays à main d'oeuvre bon marché.

MOTS-CLES: *Bacillus cereus*, or, métaux de base, géochimie sols, méthode géobactérienne, Argentine, Mexique.

1. INTRODUCTION

La méthode d'exploration géobactérienne est basée sur l'utilisation de certaines bactéries, appartenant au genre *Bacillus*, présentes à l'état naturel dans le sol. Elle a été proposée pour la première fois par une équipe pluridisciplinaire de chercheurs américains appartenant à l'Ecole des Mines du Colorado. Ce groupe était composé notamment d'un microbiologiste (John Watterson) et d'une géologue (Nancy Parduhn). Leurs résultats ont été publiés par Watterson *et al.* (1983, 1985, 1986), Watterson (1985), Parduhn & Watterson (1984), Parduhn *et al.* (1985, 1987) et Parduhn (1988, 1991).

Sous l'impulsion d'Henri Neybergh, le Service géologique de Belgique (SGB) a testé cette technique, dès 1989, sur des échantillons provenant de sites aurifères de France (Cévennes et Limousin), de Belgique (Croix-Scaille) et du Soudan (SE de Juba). Les résultats ont été publiés par Neybergh *et al.* (1991).

En 1990, le SGB a conclu une convention avec le "Consejo de Recursos Minerales" (CRM) du Mexique pour une exploration par géochimie (sol et roche) associée à un volet télédétection. Le programme s'est déroulé dans l'Etat du Michoacan, au centre ouest du Mexique (Fig. 1). Il a débuté par une phase

¹ Service géologique de Belgique, Rue Jenner 13 - B-1000 Bruxelles.

² Université libre de Bruxelles, Dép. Sc. Terre, CP 160/02, Avenue F.D. Roosevelt 50 - B-1050 Bruxelles.



Figure 1. Carte de localisation des sites d'étude sélectionnés au Mexique.

d'exploration générale couvrant une superficie de 226 km² qui a permis de délimiter un secteur aurifère de 7,5 km² dans la région d'Arteaga - Los Pozos sur lequel une exploration détaillée a été entreprise. Une importante zone d'anomalies Au-As y a été circonscrite. Les données géologiques ont permis d'intégrer ces anomalies dans un modèle géologique cohérent fournissant un guide de prospection pour l'or dans la région (Melchior *et al.*, 1992).

Un nouvel accord de collaboration a été signé en 1992 entre le SGB et le CRM en vue de tester, d'une façon approfondie, la méthode géobactérienne. Quatre sites aurifères localisés sur la figure 1 ont été sélectionnés dans trois états du Mexique caractérisés par des climats et contextes géologiques distincts : Arteaga-Los Pozos et El Real (Etat du Michoacan), Los Uvares-La Testera (Etat de Basse Californie du Sud) et Asignación Beatriz (Etat de Sonora). Les résultats ont été publiés par Melchior *et al.* (1994a,b).



Figure 2. Carte de localisation des sites d'étude sélectionnés en Argentine.

En 1994, le SGB a entamé une collaboration avec la "Dirección General de Minas y Geología" de la Province du Chubut (DGMG), en Argentine, et avec l'Université nationale de Patagonie, afin de tester la méthode géobactérienne dans un contexte climatique et géologique différent de celui du Mexique. Quatre sites aurifères localisés sur la figure 2 ont été sélectionnés en Patagonie, dans la Province du Chubut.

L'objectif de ce travail est de préciser les limites et les potentialités de la technique géobactérienne sur la base des résultats obtenus dans le cas des sites aurifères du Mexique et d'Argentine.

2. DESCRIPTION DE LA METHODE

Les résultats des études menées par les américains ont montré que la liaison entre métaux et bactéries sporulées est principalement fonction de la résistance des micro-organismes à la pénicilline (Watterson *et al.*, 1985, 1986). Plus la résistance aux antibiotiques (essentiellement à la pénicilline) est importante, plus la résistance à la toxicité des métaux est élevée. Etant donné que *Bacillus cereus* est l'espèce qui, naturellement présente dans le sol, est la plus résistante à la pénicilline, les chercheurs américains en ont déduit que la teneur en *Bacillus cereus* devait être également corrélée à la concentration des métaux dans l'horizon A. C'est sur ce postulat qu'est basée la méthode géobactérienne de prospection que nous avons testée au Mexique et en Argentine.

La méthode consiste à mettre en évidence et à quantifier les colonies sporulées de *Bacillus* réagissant à la lécithine [désignées par *Bacillus* L.(+) et exprimées sur les graphiques en CFU/g (colonies sporulées formant l'unité)]. Le critère d'identification des colonies est la présence d'une auréole translucide à transparente autour des ensembles sporulés.

L'échantillonnage est similaire à celui d'une prospection géochimique en sols. Il consiste à prélever environ 500 g de sol dans l'horizon pédologique A. L'échantillon est collecté à 5 ou 10 cm sous la surface, au niveau des racines et radicules des plantes autochtones (le plus souvent, des arbustes; des touffes herbeuses quand les arbustes sont absents). Les échantillons sont ensuite placés dans un sachet papier afin d'amorcer leur déshumidification au cours du transport. Le sac en papier est à son tour disposé dans un sachet en plastique résistant. Le tout est envoyé au laboratoire où les sols sont séchés complètement à température ambiante. Les échantillons très humides sont éventuellement mis à l'étuve sous une température qui ne peut pas dépasser 50°C.

L'étape suivante est une opération de tamisage. Des essais méthodologiques réalisés par Parduhn (1991) montrent que la granulométrie du tamisage peut influencer la reproductibilité des résultats alors que Watterson (1985) négligeait ce paramètre. Pour notre part, les échantillons ont été tamisés à -125 µm, ce qui correspond, d'après les tests de Parduhn, à la fraction donnant les résultats les plus reproductibles.

La phase analytique proprement dite consiste en une mise en culture des échantillons de sol selon la technique décrite par Watterson (1985), légèrement modifiée par Melchior *et al.* (1994b). On peut distinguer trois stades.

Dans le premier stade, 0,5 g de sol est extrait de l'échantillon. Il est mis en suspension dans 4,5 ml d'eau déminéralisée et stérilisée. La stérilisation de l'eau s'effectue à l'autoclave, à 120°C, pendant 20 minutes. Cette première suspension sera considérée comme une dilution 1:10. Des essais méthodologiques préliminaires sont nécessaires pour déterminer le nombre et le niveau de dilution à imposer. Ceux-ci dépendent du contenu en *Bacillus* L.(+) dans l'échantillon. Plusieurs tests ont montré que deux dilutions étaient généralement suffisantes pour déterminer la teneur en bactéries sporulées avec une précision analytique satisfaisante. La suspension aqueuse versée dans un tube à essai est ensuite vigoureusement secouée pendant 10 minutes. Dans le cas des échantillons du Mexique, cette suspension a été soumise à une centrifugation pendant 3 minutes à 1200 tours/mn. Par la suite, cette centrifugation s'est avérée superflue et n'a pas été appliquée aux échantillons d'Argentine. Puis, les éprouvettes sont chauffées à 90°C pendant 60 s en vue d'éliminer les micro-organismes végétatifs dont *Bacillus* L.(+). Après ce traitement, seules sont conservées les spores de *Bacillus* réagissant à la lécithine. Ce sont principalement les espèces dénommées *Bacillus cereus*, *Bacillus thuringiensis* et *Bacillus anthrax*, parmi lesquelles *Bacillus cereus* est l'espèce la plus commune.

Le stade 2, préparatoire à la mise en culture, consiste à prélever 1 ml de suspension aqueuse dans les diverses "dilutions" et à le déposer dans les boîtes de Pétri stérilisées auxquelles on incorporera ultérieurement le milieu de culture. Celui-ci aura été préparé préalablement à la mise en suspension. Les composants de base du milieu de culture sont, par litre d'eau déionisée et stérilisée :

1,0 g Na₂HPO₄
0,2 g MgSO₄.7H₂O
0,01 g FeSO₄.7H₂O
0,01 g CaCl₂
1,0 g glucose (C₆H₁₂O₆.H₂O)

0,1 g yeast extract
12 g agar-agar.

Le milieu de culture doit également être stérilisé à l'autoclave pendant 20 minutes sous une température de 120°C. Avant de déposer le substrat nutritif sur les suspensions de sol, on y aura ajouté 10 ml de jaune d'oeuf (lécithine) et 2,5 ml de citrate de sodium (C₆H₅Na₃O₇.2H₂O) à 0,05% par litre de milieu refroidi à 50°C. Enfin, le pH sera ajusté à 7,2.

Le stade analytique 3 est celui de l'incubation et consiste à maintenir les échantillons à 30°C pendant 15 à 18 heures, de préférence dans une étuve.

Finalement, les colonies sporulées sont identifiées à l'oeil nu et quantifiées sur base des halos qui les entourent. Ce procédé analytique est par conséquent relativement simple et rapide (les résultats peuvent être obtenus en 2 à 3 jours) mais exige des conditions d'hygiène et de propreté assez strictes.

3. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Les résultats géobactériens ont été publiés par Melchior *et al.* (1994a,b) pour les sites mexicains et par Melchior *et al.* (1996) pour les sites argentins. Dans les lignes qui suivent, nous nous limiterons à une présentation extrêmement synthétique de données permettant d'évaluer les performances de la méthode.

3.1. MEXIQUE

3.1.1. Arteaga - Los Pozos (Etat du Michoacan)

Ce secteur correspond à celui dans lequel des anomalies aurifères ont été circonscrites lors de la campagne d'exploration détaillée réalisée en 1991 et dont les résultats ont été publiés par Melchior *et al.* (1992). Le contexte géologique correspondant (Fig. 3) est caractérisé par la présence de trois unités lithologiques : schistes, métavolcanites andésitiques et intrusions granodioritiques et dioritiques. Le premier groupe lithologique correspond au socle prépermien et est formé principalement de schistes noirs ampélitiques à graphiteux présentant une paragenèse métamorphique de degré moyen correspondant au faciès amphibolite dans la nomenclature d'Eskola. Localement, la présence de sillimanite suggère que cet ensemble a été soumis à des hautes pressions correspondant à un métamorphisme de degré élevé. Le second groupe lithologique est constitué de matériaux volcaniques, principalement des laves andésitiques associées à des tuffs et des tuffites. Cette unité volcanique est triasique alors que le

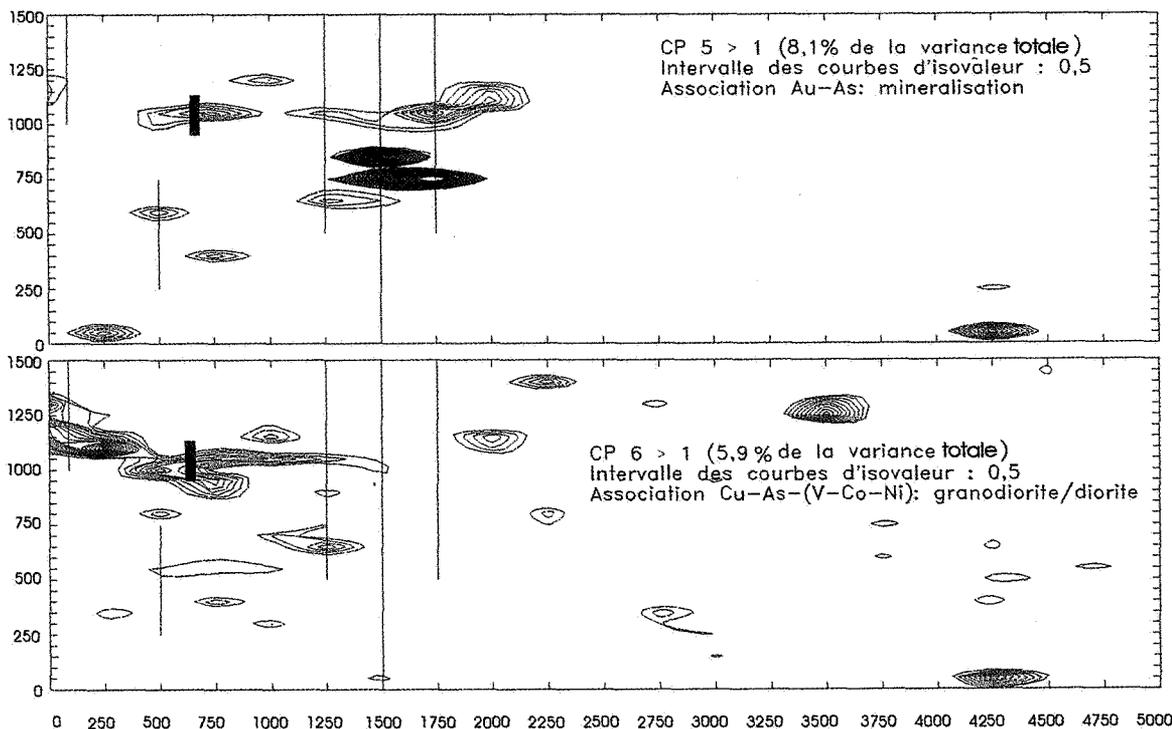
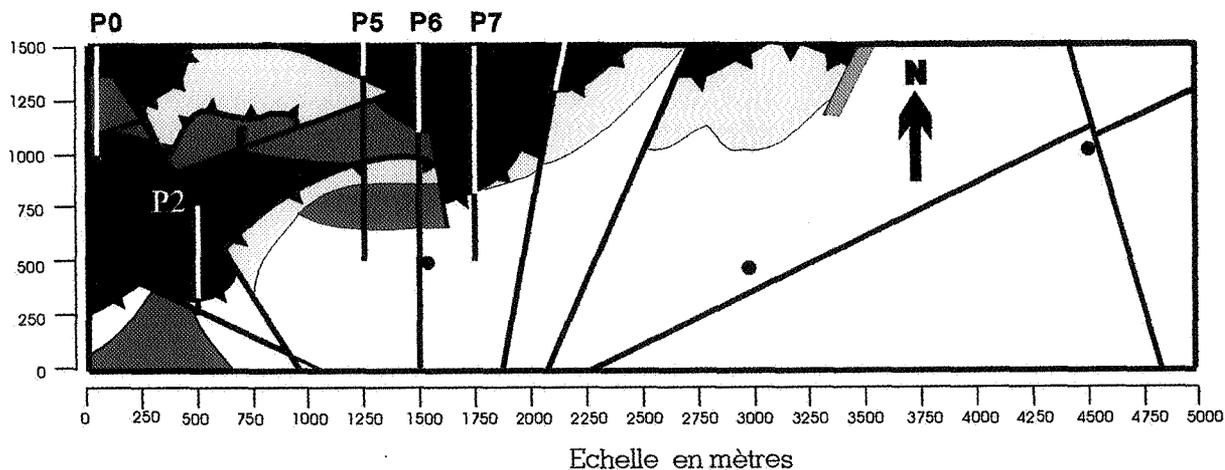
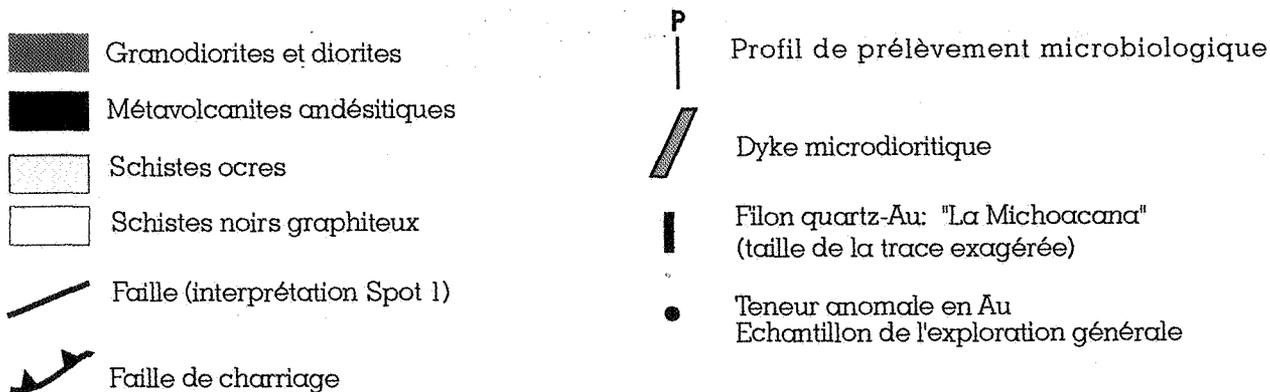


Figure 3. Secteur d'Arteaga-Los Pozos. Contexte géologique, localisation des profils d'échantillonnage (P0, P2, P5, P6 et P7) et cartes de distribution des facteurs scores illustrant la signification géochimique des composantes principales CP5 (association Au-As) et CP6 {association Cu-As-(V-Co-Ni)} (d'après Melchior *et al.*, 1994a).

métamorphisme régional qui l'affecte est crétacé. Ces deux unités lithologiques sont séparées par un charriage régional auprès duquel se développent des schistes ocres à partir des schistes noirs graphiteux. Le troisième ensemble lithologique comprend des corps intrusifs qui, dans le secteur de Los Pozos, sont de composition granodioritique et dioritique. A la figure 3, la comparaison du fond géologique et des cartes de facteurs scores montre bien que les anomalies d'association Cu-As-(V-Co-Ni) sont principalement liées aux granodiorites et diorites.

La roche hôte de la minéralisation aurifère de ce secteur est une granodiorite cénozoïque. L'élément accompagnateur de l'or est l'arsenic. L'or est également localisé dans l'encaissant volcanique et, plus particulièrement, associé aux failles recoupant les volcanites en bordure des corps intrusifs. Les épisodes de fracturation qui ont suivi le dernier épisode de métamorphisme régional ont probablement favorisé la remobilisation de l'or et sa précipitation dans ces zones cassantes. A une échelle régionale, il est clair que le contrôle structural est prépondérant dans la mise en place de la minéralisation aurifère exprimée particulièrement à Los Pozos.

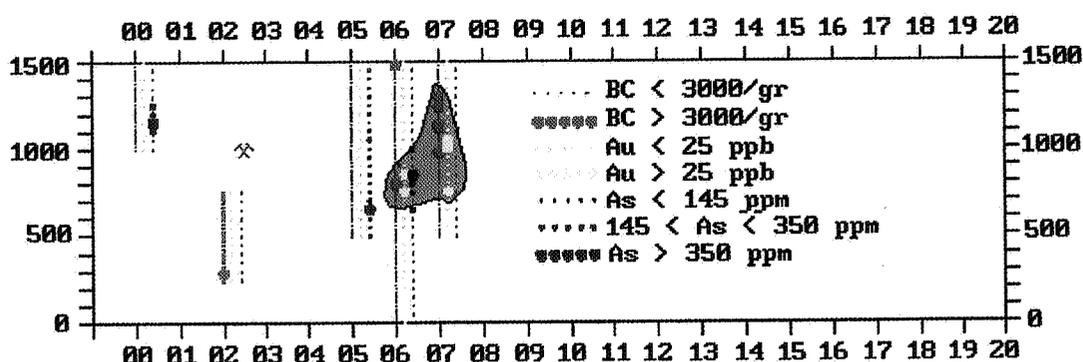
Cinq profils d'échantillonnage ont été implantés pour recouper la minéralisation aurifère de Los Pozos. Ils sont dénommés P0, P2, P5, P6 et P7 sur la figure 3. La carte d'association des anomalies d'or, d'arsenic et de *Bacillus L.(+)* (Fig. 4) révèle l'existence d'un secteur anomal en *Bacillus L.(+)* et Au (accessoirement en As) situé dans la partie centrale de la zone prospectée.

3.1.2. El Real (Etat du Michoacan)

Le secteur contenant la minéralisation polymétallique d'El Real est situé à environ 200 km au NE d'Arteaga-Los Pozos, dans un contexte géologique et climatique similaire à celui d'Arteaga. L'influence maritime y est toutefois plus réduite. On distingue deux types de minéralisations aurifères encaissées dans une granodiorite : au SE, l'or est associé à un filon de quartz, généralement de 2 m d'épaisseur, incliné à 60° vers le SSE; au NW, l'or est lié à un stockwerk de veinules sulfurées. Deux profils d'échantillonnage dénommés P1 et P2 (Fig. 5) ont été réalisés perpendiculairement aux structures minéralisées. La comparaison des teneurs en Au et *Bacillus L.(+)* (Fig. 6) révèle une corrélation spatiale entre les deux groupes. Toutefois, comme à Los Pozos, on observe, dans la moitié des cas, un décalage entre les hautes teneurs en métaux et en *Bacillus L.(+)*.

3.1.3. Asignación Beatriz (Etat de Sonora)

Le secteur d'Asignación Beatriz est localisé au NW du Mexique, dans l'Etat de Sonora, où règnent des conditions climatiques subdésertiques caractérisées par une saison sèche et une saison plus humide. La végétation est formée de cactus et d'arbustes épineux en saison sèche; en saison plus humide, une végétation basse envahit la zone. Le contexte géologique (Fig. 7) comprend principalement un ensemble de roches volcano-sédimentaires mésozoïques et de roches intrusives cénozoïques. Au



✕ Filon de quartz aurifère "La Michoacana"



ZONE ANOMALE : Au - As - Bacillus L.(+)
B C = Bacillus L.(+)

Figure 4. Secteur d'Arteaga-Los Pozos. Carte des anomalies de Au, As et *Bacillus L.(+)*. En abscisse : numérotation des profils d'échantillonnage NS distants de 250 m. En ordonnée, distance en mètres.

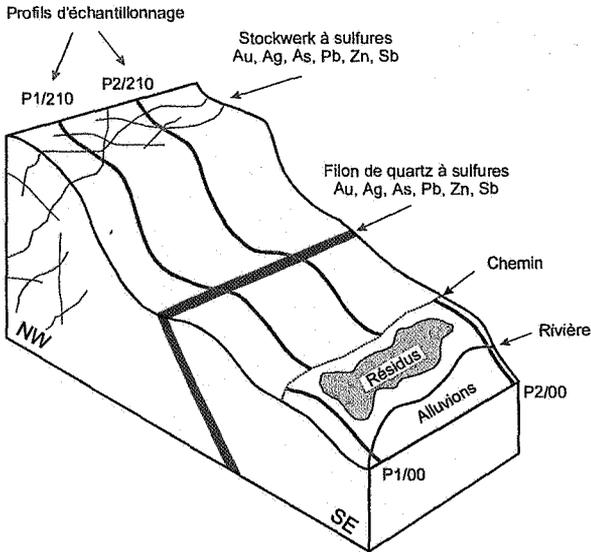


Figure 5. Secteur d'El Real. Bloc diagramme schématisant les deux types de minéralisations aurifères encaissées dans une granodiorite et la localisation des profils d'échantillonnage P1 et P2. Longueur des profils : 210 m. Echelle verticale exagérée.

NW, apparaissent des formations sédimentaires (calcaires). Plusieurs types de minéralisations existent dans cette région en relation avec les roches volcaniques et intrusives. Elles semblent se rattacher à un modèle de type porphyre cuprifère : une zonation

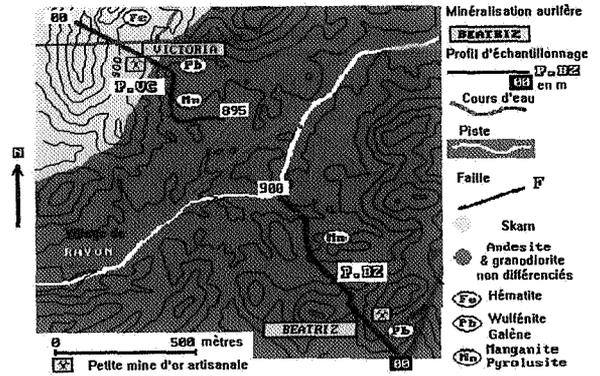


Figure 7. Secteur d'Asignación Beatriz. Carte géologique simplifiée avec localisation des profils d'échantillonnage dénommés Victoria et Beatriz.

verticale et latérale de certains éléments y est associée. Dans le cas de l'Asignación Beatriz, le corps minéralisé en Cu-Mo-Au-Ag-Pb-Zn présente une allure allongée dans la direction NW-SE. Des skarns (les "quartzites" des mineurs) se développent au NW au contact des roches carbonatées (les "quartzites" des mineurs). La minéralisation a connu plusieurs épisodes d'exploitation artisanale. Au, associé à Pb et Zn, est surtout concentré dans deux secteurs dénommés "Victoria" au NW et "Beatriz" au SE.

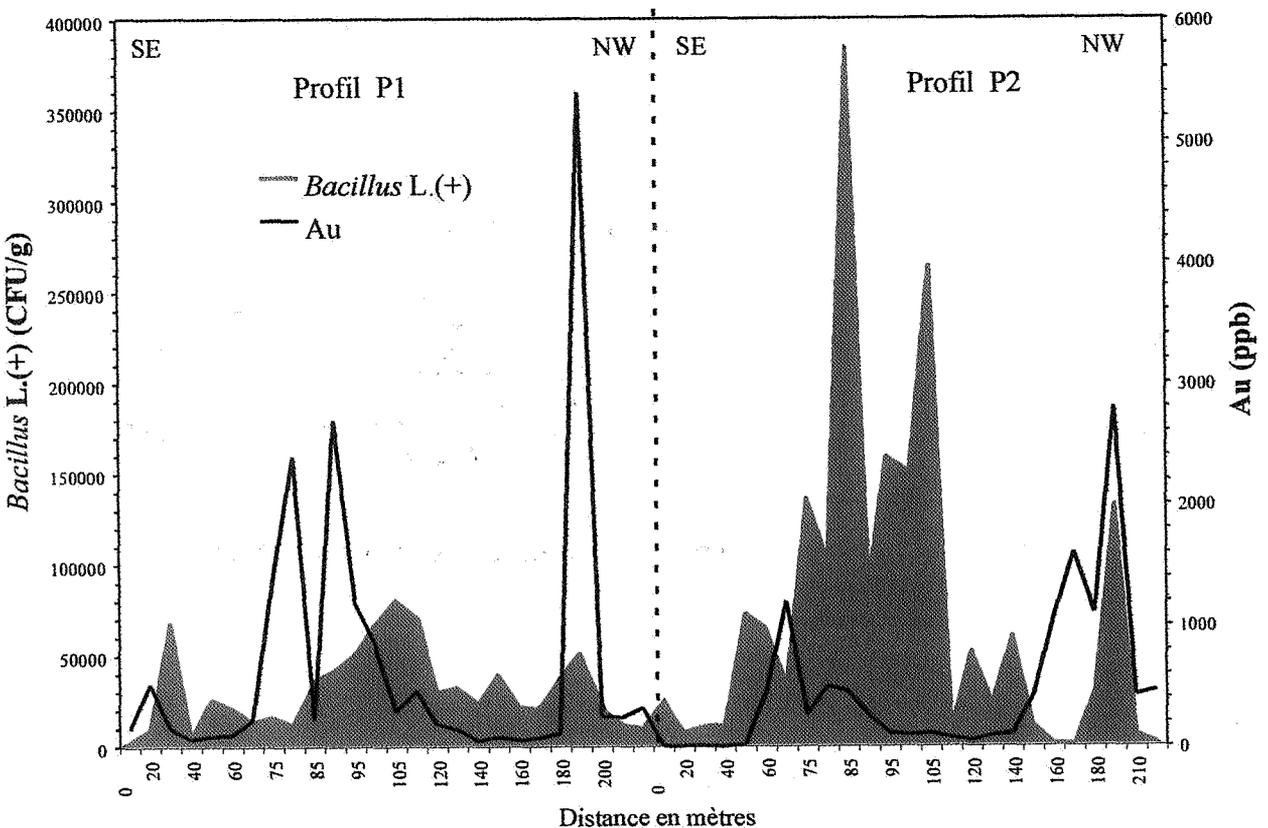


Figure 6. Secteur d'El Real. Comparaison des teneurs en Au dans l'horizon A et des teneurs en *Bacillus L.(+)* sur les profils P1 et P2.

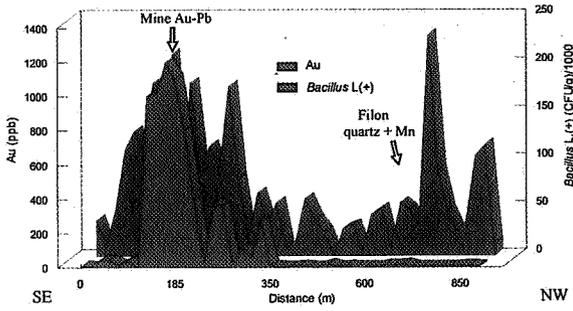


Figure 8. Secteur d'Asignación Beatriz. Graphique de distribution de Au et *Bacillus L.(+)* le long du profil Beatriz.

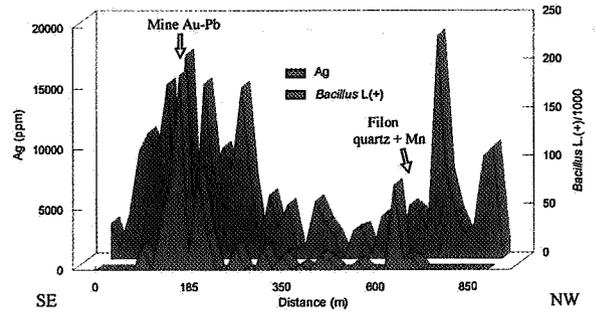


Figure 9. Secteur d'Asignación Beatriz. Graphique de distribution de Ag et *Bacillus L.(+)* le long du profil Beatriz.

Les bonnes concordances spatiales des variations en *Bacillus L.(+)*, Au et Ag sur le profil Beatriz sont montrées sur les figures 8 et 9. L'anomalie bactérienne englobe l'anomalie métallique qui surmonte la minéralisation filonienne Au-Ag. On

notera que l'auréole de dispersion pédochimique Au-Ag est beaucoup plus étroite que celle de *Bacillus L.(+)*. On notera aussi un léger décalage entre les sommets des pics de *Bacillus L.(+)* et ceux de Ag et Au.

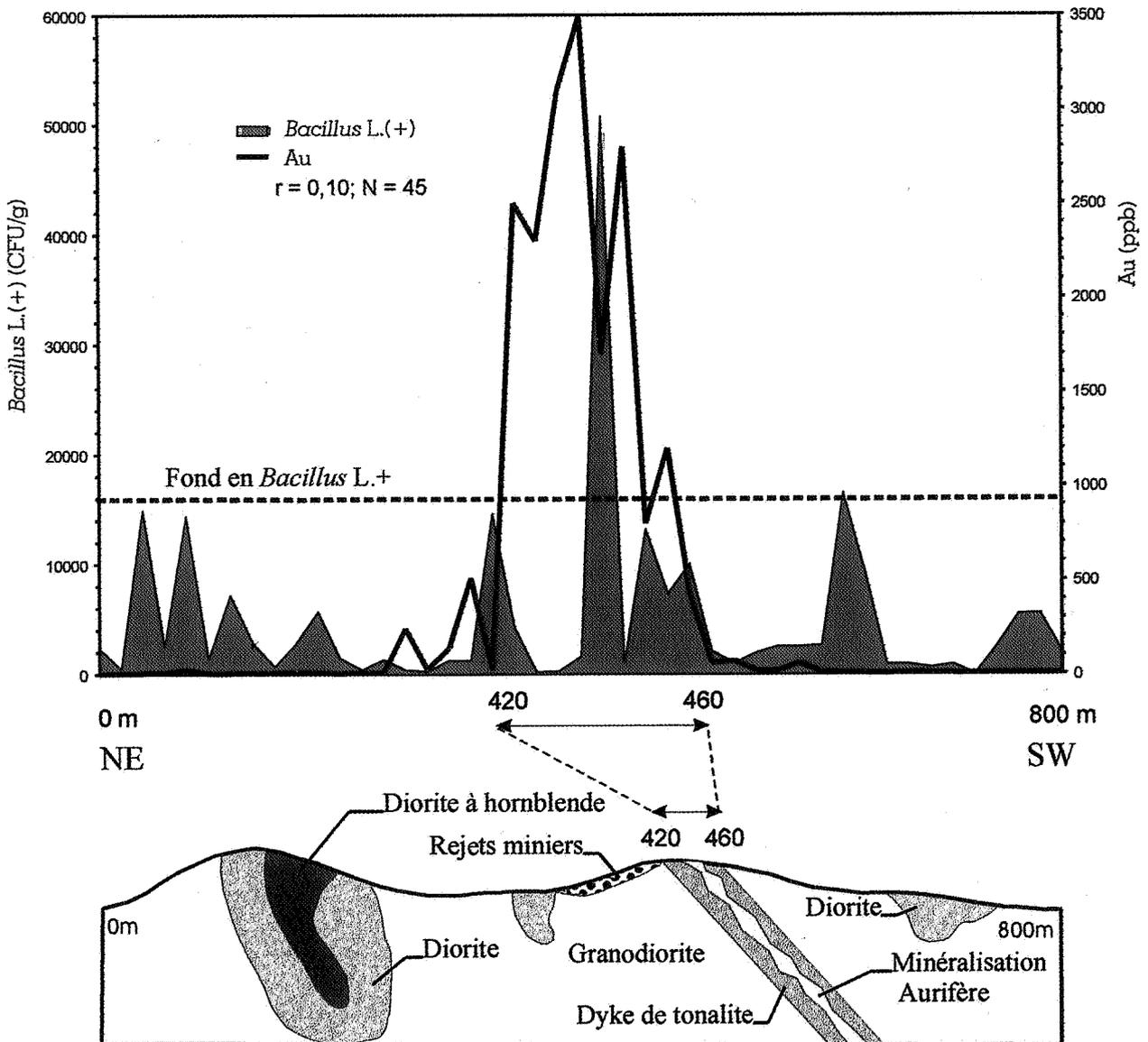


Figure 10. Site de Los Uvares. Partie supérieure : graphique de variation de Au et *Bacillus L.(+)*. L'échelle des distances est exagérée, entre 420 et 460 m, dans la zone minéralisée. Partie inférieure : coupe géologique schématique (d'après Melchior *et al.*, 1994a, 1994b, modifié).

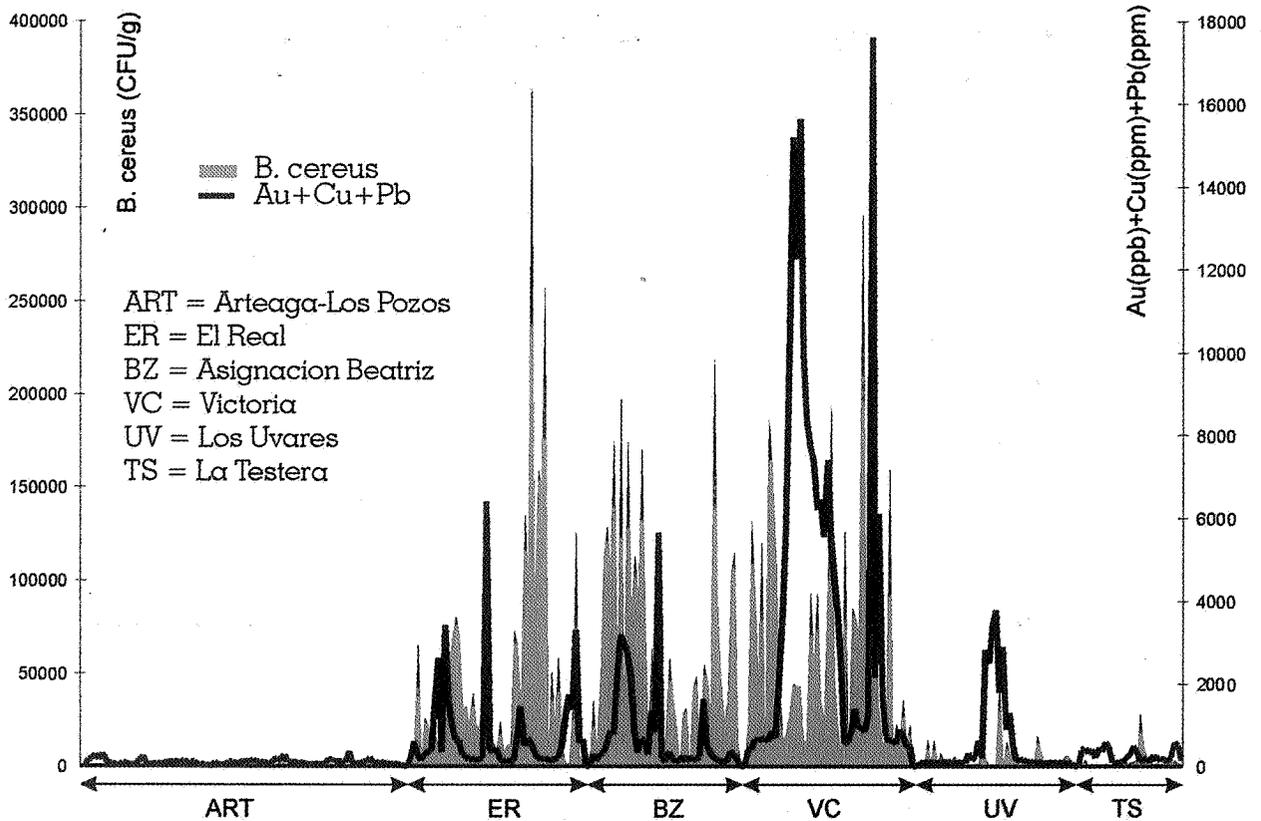


Figure 11. Comparaison des teneurs en *Bacillus* L.(+) et de la somme de Au+Cu+Pb sur tous les échantillons du Mexique (N=318) (d'après Melchior *et al.*, 1994a).

A 650 m sur le profil, on relève la présence d'une anomalie en Ag qui n'est cependant pas associée à une anomalie en Au. A cet endroit, le prélèvement de sol a été réalisé en bordure d'un filon de quartz à structure bréchique et cataclasique. A peu de distance, une anomalie bactérienne est également individualisée. La coexistence de ces observations pourrait révéler la présence en profondeur d'une minéralisation polymétallique qui ne s'exprime pas en surface.

3.1.4. Los Uvares (Etat de Basse Californie du Sud)

La minéralisation aurifère de Los Uvares s'insère dans un dyke de tonalite (microdiorite) recoupant des granodiorites et des diorites à hornblende datées du Mésozoïque supérieur (Fig. 10). Plus précisément, au sein de la tonalite, la minéralisation est associée à des lentilles quartzeuses à pyrite disséminée. L'or se trouve dans la pyrite mais aussi à l'état natif. Les résultats obtenus à Los Uvares indiquent la présence d'une anomalie ponctuelle en *Bacillus* L.(+) au-dessus de la minéralisation aurifère (Fig. 10).

3.1.5. Synthèse des résultats du Mexique

Le graphique de la figure 11 illustre la relation spatiale entre *Bacillus* L.(+) et la somme de Au + Cu

+ Pb dans l'horizon pédologique A. Malgré un décalage fréquent entre le sommet des pics de *Bacillus* L.(+) et de métaux, on observe que le contenu en *Bacillus* L.(+) est plus ou moins proportionnel à l'addition des trois métaux chalcophyles. Arteaga-Los Pozos est clairement le site le moins minéralisé et le moins riche en *Bacillus* L.(+). Les sites d'El Real, de Beatriz et de Victoria sont les plus riches en *Bacillus* L.(+) et également les plus minéralisés. Par conséquent, il existe, au Mexique, une relation semi-quantitative entre le contenu en *Bacillus* L.(+) et le degré de minéralisation.

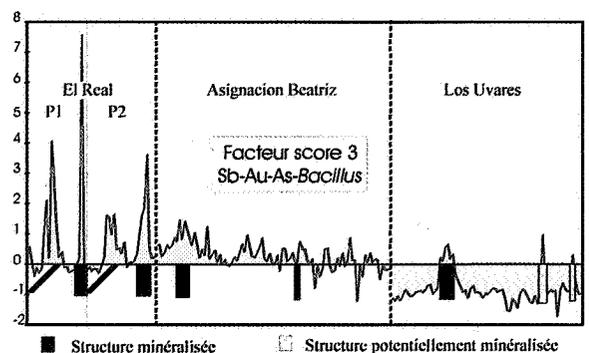


Figure 12. Variation du facteur score 3 {Sb-Au-As-*Bacillus* L.(+)} sur 318 échantillons provenant de 3 sites du Mexique (El Real Profil 1, El Real Profil 2, Asignación Beatriz et Los Uvares).

Une analyse factorielle, réalisée sur les échantillons des 3 sites mexicains (El Real, Asignación Beatriz et Los Uvares) indique une relation statistique multivariée entre *Bacillus* L.(+) et la signature pédochimique des minéralisations Au-As-Sb (Fig. 12). La valeur de *Bacillus* L.(+) dans le facteur 3 est modérée mais suffisamment significative pour affirmer qu'il existe une relation entre les minéralisations aurifères du Mexique et *Bacillus* L.(+).

3.2. ARGENTINE

Quatre sites minéralisés ont été sélectionnés au centre-ouest de la Patagonie (Fig. 2). L'analyse factorielle montre qu'il existe une relation partielle entre *Bacillus* L.(+) et la signature pédochimique des minéralisations aurifères (Fig. 13). On notera que cette relation se maintient quand on traite les résultats microbiologiques obtenus sur les mêmes échantillons analysés à des périodes différentes en Argentine (facteur score 4a) et en Belgique (facteur score 4b), malgré des variations d'intensité des teneurs mesurées.

	Facteur 4 a	Facteur 4 b
Au	0.55	0.55
Fe	0.18	0.23
Ni	-0.16	-0.11
Cr	0.15	0.20
Zn	-0.10	-0.12
Ba	-0.71	-0.67
V	-0.16	-0.18
As	0.68	0.70
Cu	0.10	0.07
Mn	-0.16	-0.18
Y	0.75	0.75
Sb	0.27	0.25
Pb	0.04	0.02
<i>Bacillus</i> Bel.	0.38	
<i>Bacillus</i> Arg.		0.43
% variance	11.50%	11.40%
Total : 71%		

3.2.1. Huemules

La structure minéralisée du site minier de Huemules est constituée d'un filon de quartz accolé à un dyke de roche basique recoupant des roches volcaniques andésitiques appartenant à la Formation de Canadon Huemules d'âge jurassique. Le quartz contient des sulfures (principalement, pyrite et chalcopyrite) oxydés en limonite, cuprite et goethite plus ou moins cuprifère. Galène, sphalérite, argent natif et or natif sont aussi présents. Bien que ce filon soit connu sur 3,6 km de longueur et que son épaisseur varie de 1,0 à 4,6 m, la minéralisation est irrégulière. Les auteurs n'ont pas eu la main heureuse dans la localisation du profil d'échantillonnage car les résultats de géochimie sol ont révélé que le filon de quartz principal était stérile en Au au droit du profil réalisé. Il est donc logique qu'à cet endroit, aucune anomalie en *Bacillus* L.(+) n'ait été enregistrée. Par contre, à d'autres endroits du profil, les anomalies positives en *Bacillus* L.(+) seraient dues à des petites veines minéralisées adjacentes au filon principal (des petits filons à chalcopyrite ont été observés sur le terrain).

3.2.2. Cerro Trompo

La région de Cajon de Ginebra Grande, dans laquelle le secteur d'exploration de Cerro Trompo est situé, comporte de nombreuses structures quartzseuses subverticales qui se dégagent en relief dans la Formation Lonco Trapial constituée de volcanites andésitiques mésozoïques. Le seul sulfure macroscopiquement visible est la pyrite, partiellement oxydée, dans laquelle la Direction des Mines et de la Géologie du Chubut a découvert des traces d'Au. Toutefois, la distribution de *Bacillus* L.(+) ne montre pas d'association particulière par rapport aux structures quartzseuses affleurantes.

3.2.3. Arroyo Cascada

De nombreux vestiges d'exploitations artisanales entreprises par les Gallois à la fin du XIXème siècle soulignent le potentiel minéral de la région d'Arroyo Cascada. Dans la zone étudiée, des tranchées correspondant à des anciens travaux miniers s'égrènent sur 300 m de longueur. La minéralisation apparaît dans des corps quartzseux d'épaisseur pluridécimétrique à métrique renfermant des fortes teneurs en sulfures (principalement, pyrite et arsénopyrite). Les roches encaissantes consistent en une série volcanique de composition andésitique d'âge jurassique inférieur à crétacé inférieur (Formation de Lago La Plata).

Les résultats bactériens obtenus sur le site d'Arroyo Cascada sont assez parlants. La partie sud du profil

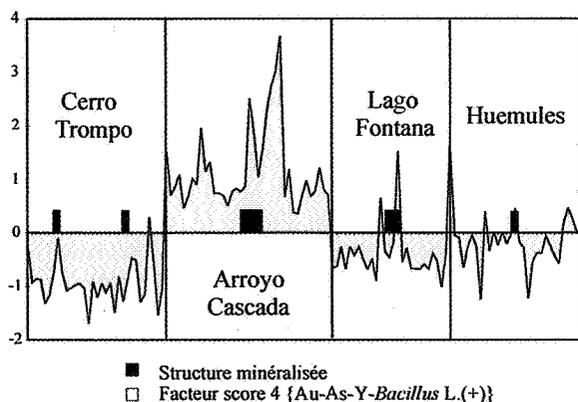


Figure 13. Variation du facteur score 4 {Au-As-Y-*Bacillus* L.(+)} sur l'ensemble des échantillons d'Argentine (N=130). Le facteur 4a correspond aux analyses bactériennes effectuées en Argentine; le facteur 4b, à celles effectuées en Belgique.

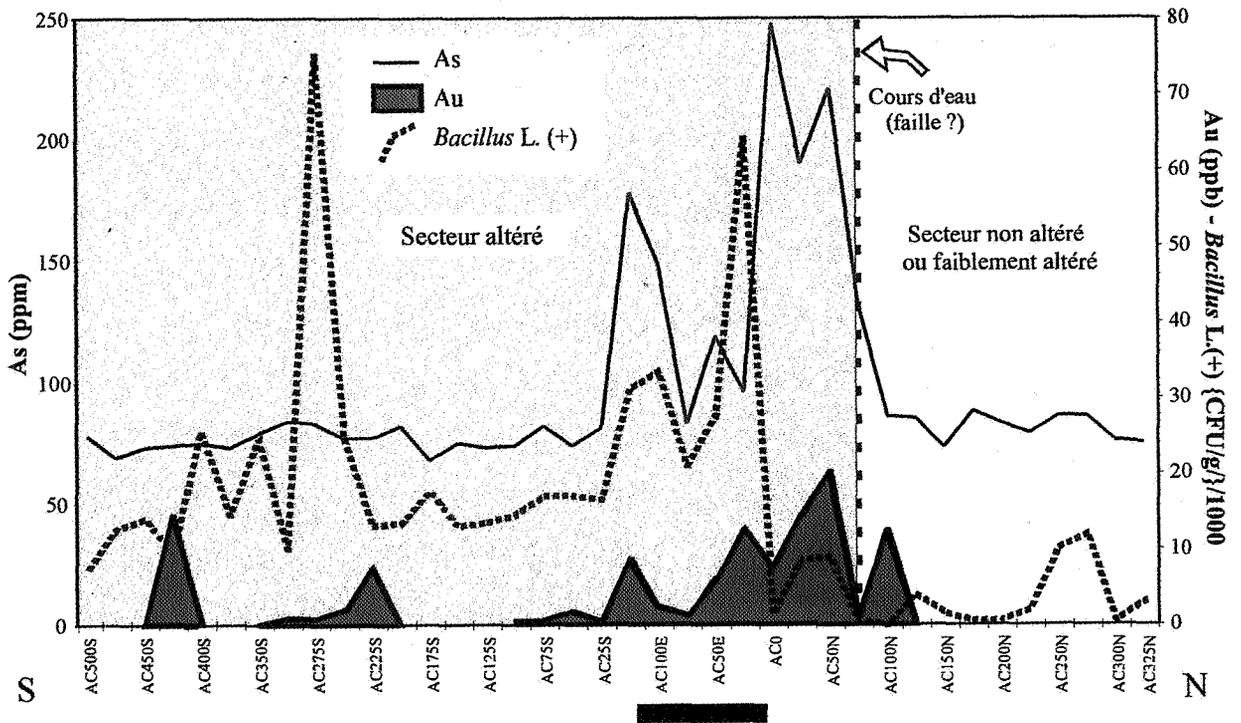


Figure 14. Secteur d'Arroyo Cascada. Diagrammes de variation de Au, As et *Bacillus L.(+)*. Les analyses bactériennes ont été effectuées en Argentine en Décembre 1994. Trait épais sous la ligne de numérotation des échantillons, échantillonnage effectué parallèlement à la direction du filon; ailleurs, perpendiculairement.

d'échantillonnage (Fig. 14) se distingue clairement de la partie nord par ses plus hautes valeurs en *Bacillus L.(+)*, notamment au-dessus de la zone minéralisée affleurante plus riche en Au. L'altération hydrothermale est également bien marquée dans le profil sud alors qu'elle est faible ou inexistante dans le profil nord. L'anomalie en *Bacillus L.(+)* située au milieu de la partie sud du profil (échantillon AC275S) et le fond élevé en *Bacillus L.(+)* associé à des petits pics en Au pourraient être en relation à cet endroit avec une minéralisation aurifère disséminée.

3.2.4. Lago Fontana

Le site de la vieille mine dénommée "La Ilusion" (ou "La Ferrocarrilera") sur la rive sud du lac Fontana correspond à un filon de quartz contenant sphalérite et galène avec des quantités mineures de chalcopryrite et de pyrite. Ce filon s'étend sur 400 m de long avec des épaisseurs de 2,5 à 3 m (direction : N20-50°E ; pendage : 45-85°NW). Les roches encaissantes sont des roches andésitiques d'âge jurassique.

La figure 15 montre l'association entre le contenu en *Bacillus L.(+)* et la minéralisation polymétallique filonienne. *Bacillus L.(+)* est principalement corrélé à Au et, dans une moindre mesure, à Pb et Zn. Notons

que les teneurs des différents métaux n'évoluent pas toujours dans le même sens.

En résumé, deux sites d'Argentine (Arroyo Cascada et Lago Fontana) montrent une évidente corrélation entre *Bacillus L.(+)* et minéralisation (en particulier avec l'or). Les deux autres sites (Huemules et Cerro Trompo) présentent des résultats moins clairs que l'on peut expliquer par les très faibles teneurs de Au dans les sols à ces endroits.

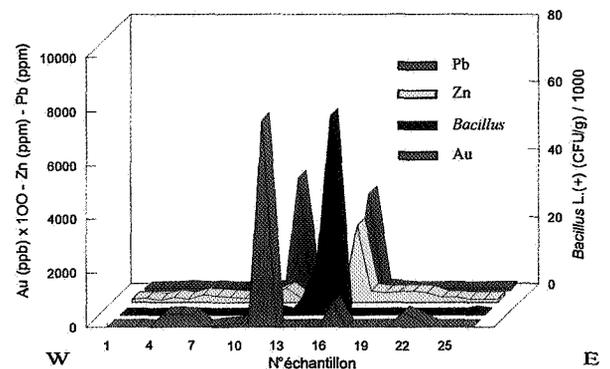


Figure 15. Lago Fontana. Diagrammes de variation de Au, Zn, Pb et *Bacillus L.(+)*. Les analyses bactériennes ont été effectuées en Argentine en Décembre 1994. Les échantillons de sols ont été prélevés de 25 en 25 m perpendiculairement à la direction du filon, sauf pour les échantillons 12 à 16 qui ont été sélectionnés à l'aplomb du filon, à des distances d'une dizaine de mètres les uns des autres.

3.3. REPRODUCTIBILITE DES RESULTATS MICROBIOLOGIQUES

Afin de tester la reproductibilité des résultats bactériens, d'une part les analyses effectuées en Argentine en décembre 1994 ont été répétées en Belgique en mai-juin 1995, d'autre part les analyses ont été réitérées au cours de chaque session analytique. En bref, la reproductibilité est bonne au cours d'une même session analytique, tant en Argentine ($R^2 = 0,9593$ - figure 16, partie supérieure) qu'en Belgique ($R^2 = 0,8762$ - figure 16, partie inférieure). En revanche, elle se dégrade dans le temps (après 4 à 5 mois, $R^2 = 0,652$ - figure 17). La comparaison des résultats du Mexique et d'Argentine semble indiquer que la température et peut-être, l'hygrométrie, régnant lors de la mise en culture ont une importance prépondérante sur la reproductibilité. En conséquence, ces résultats suggèrent qu'il est préférable d'analyser rapidement les échantillons dans des conditions identiques à celles régnant lors de l'échantillonnage.

4. CONCLUSIONS

4.1. AVANTAGES DE LA METHODE

Les avantages principaux de la méthode microbiologique sont :

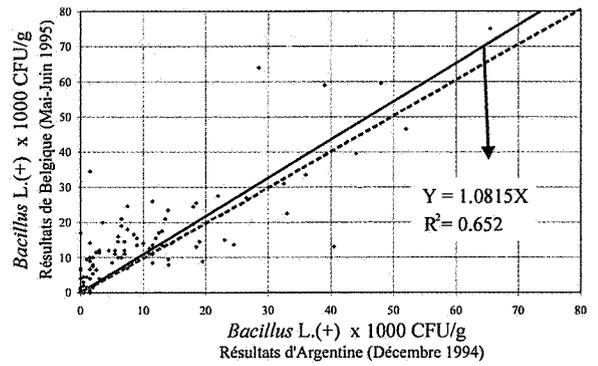


Figure 17. Diagramme de corrélation entre les analyses microbiologiques effectuées en Argentine (en décembre 1994) et en Belgique (en mai-juin 1995). Ligne en pointillé: $X = Y$. Ligne en trait continu, meilleure corrélation linéaire passant par l'origine des axes.

- * la simplicité du matériel;
- * le prix extrêmement bas de l'analyse bactérienne lié au faible prix des produits analytiques : de l'ordre de 50 BEF (1 à 2 US\$) par échantillon, en excluant les coûts de personnel;
- * la rapidité d'obtention des résultats (quelques jours);
- * le fait que le laboratoire puisse éventuellement être installé dans un véhicule.

Cette méthode est donc particulièrement intéressante dans des pays où la main d'oeuvre est très bon marché et où la prospection nécessite des résultats rapides.

4.2. DESAVANTAGES DE LA METHODE

Le désavantage essentiel de la technique géobactérienne réside dans sa plus faible reproductibilité par rapport aux analyses chimiques. Ce désavantage ne doit cependant pas être considéré comme un argument pénalisant la méthode : les tests de reproductibilité ont montré que le contraste entre anomalies et fond bactériologique reste très constant au cours du temps. En outre, même s'il n'y a pas de relation quantitative entre métaux et contenu en *Bacillus cereus* dans l'horizon A, à l'échelle régionale, il existe une correspondance nette entre degré de minéralisation et teneur en *Bacillus cereus*.

Dans l'éventualité de l'utilisation de cette technique en prospection détaillée, un autre désavantage est le décalage fréquemment observé entre anomalie géochimique et anomalie bactérienne.

4.3. DOMAINE D'APPLICATION DE LA METHODE

Cette technique très peu coûteuse et rapide pourrait être utilisée avec succès lors de campagnes

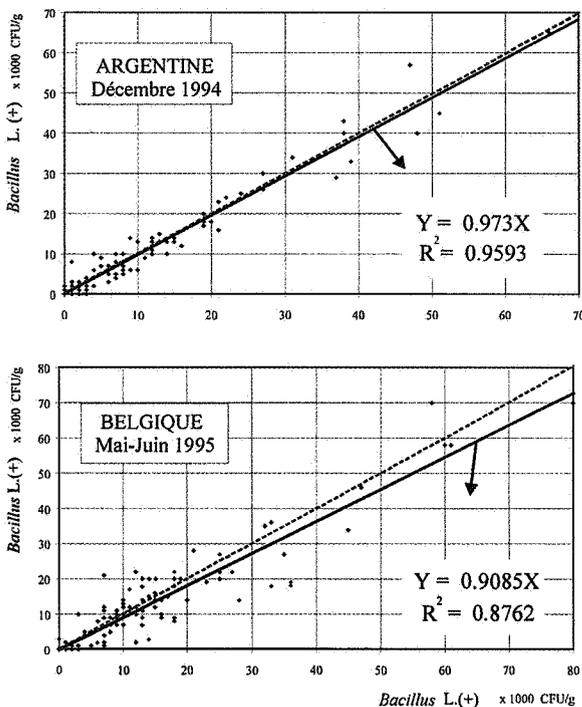


Figure 16. Diagrammes de corrélation linéaire des résultats microbiologiques répétés pendant la même session analytique en décembre 1994 (Argentine) et mai-juin 1995 (Belgique). Ligne en pointillé: $X = Y$. Ligne en trait continu, meilleure corrélation linéaire passant par l'origine des axes.

géochimiques préliminaires à l'échelle régionale pour la prospection de l'or et métaux associés, dans des pays où la main d'oeuvre est bon marché. Etant donné le décalage fréquent entre anomalies bactériennes et géochimiques, cet outil de prospection ne permet cependant pas d'affinement au stade d'exploration détaillée ou locale. Il s'agit donc d'un outil qui a sa place en amont des méthodes classiques de prospection.

5. REMERCIEMENTS

Les études réalisées au Mexique ont été co-financées par le Service géologique de Belgique et par le Consejo de Recursos Minerales du Mexique. Les études effectuées en Argentine ont été financées par le Service géologique de Belgique et le support logistique a été fourni par la Dirección General de Minas y Geología del Chubut. Nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ces travaux, en particulier J. Cardenas au Mexique et G. Hughes en Argentine. Des remerciements sont également adressés aux deux relecteurs, les professeurs J. Moreau (Université catholique de Louvain) et A.M. Fransolet (Université de Liège), dont les remarques ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit.

6. BIBLIOGRAPHIE

MELCHIOR, A., CARDENAS, J. & DEJONGHE, L., 1994a. Etude géobactériochimique de minéralisations aurifères et polymétalliques du Mexique. *Chron. Rech. min.*, 517: 3-21.

MELCHIOR, A., CARDENAS, J. & DEJONGHE, L., 1994b. Geomicrobiology applied to mineral exploration in Mexico. *Journ. Geochem. Explor.*, 51: 193-212.

MELCHIOR, A., DEJONGHE, L. & HUGHES, G., 1996. A geomicrobiological study of soils from auriferous areas in Argentina. *Journ. Geochem. Explor.*, pagination à préciser.

MELCHIOR, A., NEYBERGH, H., DEJONGHE, L., BUVE, L., CARDENAS, J., NUNEZ, J. & BASTIDA, R., 1992. Exploration minérale par géochimie des sols dans la région d'Arteaga (Michoacan, Mexique). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 155: 227-243.

NEYBERGH, H., MOUREAU, Z., GÉRARD, P., VERRAES, G. & SULTEN, E., 1991. Utilisation des concentrations de *Bacillus cereus* dans les sols comme technique de prospection des gîtes aurifères. *Chron. Rech. min.*, 502: 37-46.

PARDUHN, N.L., 1988. A bacterial method of mineral exploration using *Bacillus cereus*. *Proc. Randol Perth Int. Gold Conf.*, Perth: 14-16.

PARDUHN, N.L., 1991. A microbial method of mineral exploration: a case history at the Mesquite deposit. *J. Geochem. Explor.*, 41: 137-149.

PARDUHN, N.L. & WATTERSON, J.R., 1984. Preliminary studies of *Bacillus cereus* distribution near a gold vein deposit and a disseminated gold deposit. *U.S. Geol. Surv. Open File*, 84-509: 6 p.

PARDUHN, N.L., WATTERSON, J. R. & SILBERMAN, M.L., 1985. Geomicrobial exploration for subsurface gold deposits. Denver Region. *Explor. Geol. Symp. Denver*: 6 p.

PARDUHN, N.L., WATTERSON, J.R. & SILBERMAN, M.L., 1987. Distribution of *Bacillus cereus* spores over four subsurface gold deposits, a progress report. *Proc. Denver Region. Explor. Geol. Soc. Symp., Organic and Ore Dep.*: 115-118.

WATTERSON, J.R., 1985. A procedure for estimating *Bacillus cereus* in soil and stream sediment samples - a potential exploration technique. *J. Geochem. Explor.*, 23: 243-252.

WATTERSON, J.R., CLARK, J.R., LEATHAM, S., TUCKER, R.E., PARDUHN, N.L. & ELIOTT, S.S., 1983. *B. cereus*, a metal indicator organism - possible application in prospecting. *10th. Int. Geochem. Explor. Symp., August 29 - September 2 1993, Espoo, Helsinki, Finland, abstract.*

WATTERSON J.R., ELIOTT, S.S., PARDUHN, N.L. & UPDEGRAFF, O.M., 1985. Discovery of naturally-induced multiple-antibiotic resistance in soil derived from a copper deposit. *Ann. Meet. Am. Soc. Microbiol., Las Vegas, NV, abstract*: 270.

WATTERSON, J.R., NAGY, L.A. & UPDEGRAFF, O.M., 1986. Penicillin resistance in soil bacteria is an index of soil metal content near a porphyry copper deposit and near a concealed massive sulfide deposit. In: D. Carlisle, W.L. Berry, I.R. Kaplan and J.R. Watterson (Editors), *Mineral Exploration: Biological Systems and Organic Matter*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ: 328-350.

Manuscrit reçu le 18.12.1995 et accepté pour publication le 30.09.1996.