



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

**GEOQUIMICA MODERNA DE PROSPECCION**

**A N E X O S**

**DR. JUAN GONI**

**MARZO, 1982**





Tableau 5

Principales études réalisées à ce jour sur la pollution de l'eau par l'asbeste

| Auteurs   | Analyse  | Type de source | Echantillonnage des sources             | Analyse sources         | Conal- sation | Filtration | Echantillonnage distribution          | Analyse distribution                             |
|---|----------|----------------|---|-------------------------|---------------|------------|---------------------------------------|--|
| CUNNINGHAM, 1973  | e        | SURF           | Ottawa River                            | 9,5 10 <sup>6</sup> /l  | -             | NF         | Hull (Ottawa River)                   | 9,5 10 <sup>6</sup> /l                           |
| "   | e        | SURF           | Non analysée                            | -                       | -             | F          | 5 villes du Québec                    | 2 à 6 10 <sup>5</sup> /l                         |
| "   | e        | SURF           | Non analysée                            | -                       | -             | NF         | 3 villes du Québec                    | 8 à 170 10 <sup>5</sup> /l                       |
| SARGENT, 1973   | OPT      | PUITS          | (Etat de Vermont (USA))                 | 2,5 10 <sup>3</sup> /l  | For           | -          | Etat de Vermont (USA)                 | { 14 10 <sup>3</sup> /l                          |
| "   | OPT      | SURF           |   | 12,5 10 <sup>3</sup> /l | AC            | -          |                                       |  |
| National Environment Research Center  | OPT      | -              | -                                       | -                       | -             | -          | 38 prélèvements au hasard U.S.A.      | 1 à 46 10 <sup>3</sup> /l                        |
| KAY, 1973   | e        | SURF           | Précisé, mais analyse non réalisée      | -                       | -             | F          | 22 villes de l'Ontario                | 0,1 à 2,5 10 <sup>6</sup> /l                     |
| Ontario Research Foundation   |          |                |   |                         |               | NF         |                                       | 0,4 à 4 10 <sup>6</sup> /l                       |
| NICHOLSON, 1974   | e        | SURF           | Silver Bay, Lac supérieur               | -                       | -             | NF         | 3 réservoirs de distribution à Duluth | 17 à 74 10 <sup>6</sup> /l                       |
| COOK, 1974  | e<br>x   | SURF           | Lac supérieur                           | -                       | -             | NF         | Eau de distribution à Duluth          | 1 - 30 10 <sup>6</sup> /l<br>0,2 µg/l            |
| International joint Commission from the Great Lakes Research Advisory Board | e        | SURF           | Région des grands lacs                  | -                       | -             | F<br>NF    | Villes de la région des grands lacs   | 0,2 10 <sup>5</sup> /l<br>1,8 10 <sup>6</sup> /l |
| American Water-works Association Research Foundation, 1974                  | e        | PUITS          | Malver, Pennsylvanie (roche serpentine) | 0,04 µg/l               | AC            | -          | Eau de consommation                   | 0,11 µg/l  |
|   | e        | PUITS          | Glendale, Arizona                       | 0,005 µg/l              | AC            | -          | "                                     | 0,009 µg/l                                       |
|   | e        | SURF           | Juniata Rivière Connecticut             | 1 à 4 µg/l              |               |            |                                       |  |
|   | e        | SURF           | Rivière                                 | 1 à 12 µg/l             |               |            |                                       |  |
| ELZENCA, 1974   | OPT<br>e | PUITS          |   |                         | AC            | -          | Eau de consommation aux Pays-Bas      | e à 10 <sup>6</sup> /l<br>10 <sup>5</sup> /l     |

e : microscopie électronique - OPT : optique - x : rayons X (diffractométrie) - SURF : eaux de surface - F : eaux filtrées  
 - : non analysé - For : forage - AC : analyses en continu (chromatographie) - Conal : conalissation en fonte



| Echantillon              | Origine  | Nombre de fibres/<br>L x 10 <sup>6</sup> |
|--------------------------|--|--|
| Bière                    | Canada 1   | 4,3                                      |
| Bière                    | Canada 2   | 6,6                                      |
| Bière                    | U.S.A. 1   | 2,0                                      |
| Bière                    | U.S.A. 2   | 1,1                                      |
| Xérès                    | Canada   | 4,1                                      |
| Xérès                    | Espagne  | 2,0                                      |
| Xérès                    | Afrique du Sud   | 2,6                                      |
| Porto                    | Canada   | 2,1                                      |
| Vermouth                 | France   | 1,8                                      |
| Vermouth                 | Italie   | 11,7                                     |
| Boissons non alcoolisées | Ginger ale   | 12,2                                     |
| Boissons non alcoolisées | Tonic water I  | 1,7                                      |
| Boissons non alcoolisées | Tonic water II   | 1,7                                      |
| Boissons non alcoolisées | Orange   | 2,5                                      |
| Eau de robinet           | Ottawa, rivière Ottawa (F)   | 2,0                                      |
| Eau de robinet           | Toronto, Lac Ontario (F)   | 4,4                                      |
| Eau de robinet           | Montréal, fleuve St Laurent (F)  | 2,4                                      |
| Eau de robinet           | Hull, Québec, rivière Ottawa (NF)  | 9,5                                      |
| Eau de robinet           | Beauport, Québec, fleuve St Laurent<br>(6 km en amont de la ville de Québec)<br>(NF) | 8,1                                      |
| Eau de robinet           | Drummondville, cantons de l'Est,<br>Québec, rivière St François (F)                  | 2,9                                      |
| Eau de robinet           | Abérestos, cantons de l'Est,<br>Québec, rivière Nicolet (F)                          | 5,0                                      |
| Eau de robinet           | Thetford Mines, cantons de l'Est,<br>Québec, Lac à la truite (NF)                    | 172,7                                    |
| Neige fondue             | Ottawa, maximum 30 cm (2 à 3 semaines<br>de précipitation)                           | 33,5                                     |
| Eau de rivière           | Rivière Ottawa, à Ottawa   | 9,5                                      |

F : eau filtrée  
NF : eau non filtrée

FIBRES D'ASBESTES DANS LES BOISSONS ET L'EAU



| Element                          | U.S.G.S.           | D.P.C.M.         |             | Comments           |
|----------------------------------|--------------------|------------------|-------------|--------------------|
|                                  | Method             | Method           | Sensitivity |                    |
| Ag                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      | seps extr. solvent |
| Al                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Alkalinity                       | Titrimetric        | Titrimetric      | -           |                    |
| As                               | P                  | A.A.             | 1 µg/l      | direct             |
| B                                | S                  | C. (autocl.)     | 0.1 µg/l    |                    |
| Ba                               | S                  | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| Be                               | S                  | SCP              | 0.1 µg/l    |                    |
| Bi                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cd                               | Oxidation deficit. | -                | -           |                    |
| Ce                               | A.A.               | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cd                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cl                               | T                  | E.S.             | 1 µg/l      |                    |
| Co                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cr                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cu                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| En                               | E.S.               | E.S.             | -           |                    |
| F                                | C.                 | E.S.             | 20 µg/l     |                    |
| Fe (t)                           | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Fe <sup>++</sup>                 | C                  | C                | -           |                    |
| Hg                               | A.A. open flame    | A.A. open flame  | 0.1 µg/l    |                    |
| K                                | A.A.               | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| Li                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      | seps extr. l       |
| Mg                               | A.A.               | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| Mn                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Mo                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| N(NH <sub>3</sub> )              | C (Kjeldahl)       | C (Kjeldahl)     | 1 µg/l      |                    |
| N(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | C                  | E.S.             | 1 µg/l      |                    |
| N(NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) | C                  | C                | 0.1 µg/l    |                    |
| N <sub>2</sub>                   | A.A.               | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| Na                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| P(t)                             | C                  | SCP              | 1 µg/l      |                    |
| Pb                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| K <sub>2</sub> O                 | S                  | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| SiO <sub>2</sub>                 | C                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Cr                               | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| SO <sub>4</sub>                  | C                  | reduction titric | 1 µg/l      |                    |
| Sr                               | S                  | A.A.             | 0.1 µg/l    |                    |
| Ti                               | S                  | C or SCP         | 100 µg/l    |                    |
| V                                | S                  | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Zn                               | A.A.               | A.A.             | 1 µg/l      |                    |
| Zr                               | S                  | -                | -           |                    |

S = spectrophotometric  
 E.S. = electrostatic sedimentation  
 SCP = spectrophotometric

P = precipitation  
 C = colorimetric





| élément   | concentration dans les réserves géochimiques (ppm) | concentration dans les sols (total) (ppm) | concentration dans les plantes (ppm)             | valeurs critiques dans l'alimentation animale (ppm) | concentration dans le sang humain (µg/100 ml) | extraction annuelle (kg) | prélèvement annuel par plantes et récoltes (kg) | temps d'épuisement dans les sols (années) |
|-----------|--|---|--|---|---|--------------------------|---|---|
| Cade      | a : 0.5  | 5   | non déterminé                                    | déterminé à 0.1-1                                   | 0-12  | $2 \times 10^4$          | $10^7$  | $10^4$                                    |
|           | b : 1-2  |   | normale 0.4                                      | peu toxique   |   |                          |   |   |
|           | c : 0.08   |   | toxique à 10-20                                  |   |   |                          |   |   |
| Plomb     | a : 12.5   | 10 (2-200)                                | non déterminé                                    | non déterminé                                       | 27  | $2 \times 10^5$          | $10^7$  | $10^4$                                    |
|           | b : 5-20   |   | normale 0.1-10                                   | toxicité modérée                                    |   |                          |   |   |
|           | c : 0.0003   |   | toxique dans hydroponie                          |   |   |                          |   |   |
| Fungicide | a : 1000   | 850 (100-4000)                            | déterminé  | déterminé à 10 - 40                                 | 3   | $6 \times 10^5$          | $10^8$  | $10^3$                                    |
|           | b : 50-1100  |   | normale 15-100                                   | peu toxique   |   |                          |   |   |
|           | c : 0.002  |   | toxicité dépend de Fe : Mn ratio                 |   |   |                          |   |   |
| Molybdène | a : 1.5  | 2 (0.2-5)                                 | déterminé à 0.1                                  | déterminé à 0.1                                     | 2   | $3 \times 10^7$          | $10^7$  | $10^3$                                    |
|           | b : 0.2-3  |   | normale 1-100                                    | toxicité modérée à élevée dépend de Cu              |   |                          |   |   |
|           | c : 0.01   |   | peu toxique                                      |   |   |                          |   |   |
| Nickel    | a : 75   | 40 (10-1000)                              | non déterminé                                    | non déterminé                                       | 1-8   | $3 \times 10^6$          | $10^7$  | $10^4$                                    |
|           | b : 2-70   |   | normale 1  | toxicité modérée à faible                           |   |                          |   |   |
|           | c : 0.0054   |   | toxique à 50                                     |   |   |                          |   |   |
| Selenium  | a : 0.05   | 0.5 (0.1-7.0)                             | non déterminé                                    | déterminé à 0.05-0.70                               | 20  | $8 \times 10^5$          | $10^7$  | $10^3$                                    |
|           | b : 0.1-1.0  |   | normale 0.02-2.0                                 | hautement toxique                                   |   |                          |   |   |
|           | c : 0.00009  |   | élevée dans les accumulateurs ; toxique à 50-100 |   |   |                          |   |   |
| Strontium | a : 375  | 300 (50-1000)                             | non déterminé                                    | non déterminé                                       | 1   | $4.8 \times 10^7$        | $10^8$  | $10^3$                                    |
|           | b : 20-700   |   | normale 5-3000                                   | bénéfique pour dents et os                          |   |                          |   |   |
|           | c : 0.1  |   | non toxique                                      | risque 90%  |   |                          |   |   |
| Vanadium  | a : 135  | 100 (20-500)                              | déterminé pour certaines algues                  | non déterminé                                       | 1-2   | $6 \times 10^6$          | $10^7$  | $10^4$                                    |
|           | b : 20-150   |   | normale 0.1-10                                   | peut être bénéfique                                 |   |                          |   |   |
|           | c : 0.002  |   | toxicité 10                                      | toxicité modérée                                    |   |                          |   |   |
| Zinc      | a : 70   | 50 (10-300)                               | déterminé à 0-15                                 | déterminé à 10-40                                   | 550   | $3 \times 10^6$          | $10^8$  | $10^3$                                    |
|           | b : 10-100   |   | toxique à 700                                    | toxicité faible                                     |   |                          |   |   |
|           | c : 0.01   |   |  |   |   |                          |   |   |

a : valeur pour les roches ignées  
 b : valeur pour les roches sédimentaires  
 c : valeur pour l'eau de mer

Concentrations et temps des éléments en trace affectés dans les différents éléments de l'environnement



| élément   | concentration dans les réserves géochimiques (ppm) | concentration dans les sols (total) (ppm) | concentration dans les plantes (ppm)                           | valeurs critiques dans l'alimentation animale (ppm)  | concentration dans le sang humain (µg/100 ml) | extraction minière annuelle (kg) | prélèvement annuel par plantes et récoltes (kg) | temps d'épuisement dans les sols (années) |
|-----------|--|---|--|--|---|----------------------------------|---|---|
| Arsenic   | a : 7<br>b : 1-3<br>c : 0.003                      | 6 (0.1 - 40)                              | 5 (0.1-5)<br>non déterminé                                     | non déterminé<br>certains composés médicinaux<br>As <sup>3</sup> , hautement toxique<br>As <sup>5</sup> , modérément toxique | 48  | 2.7 x 10 <sup>6</sup>            | 10 <sup>7</sup>                                 | 10 <sup>2</sup>                           |
| Bore      | a : 10<br>b : 20-100<br>c : 4.6                    | 10 (2 - 100)                              | déficit, 5-30<br>toxicité = 75 (grandes différences d'espèces) | non déterminé<br>peu toxique   | 21  | 10 <sup>6</sup>                  | 10 <sup>6</sup>                                 | 10 <sup>2</sup>                           |
| Béryllium | a : 3<br>b : 1-5<br>c : 0.0000006                  | 6 (1-40)                                  | < 0.1<br>non déterminé<br>toxique                              | non déterminé<br>hautement toxique   | < 0.01  | 2.6 x 10 <sup>5</sup>            |   |   |
| Bismuth   | a : 0.17<br>b : 0.3-1<br>c : 0.000017              |   | 0.08<br>non déterminé<br>toxique                               | non déterminé<br>toxicité modérée  | < 1   | 1.4 x 10 <sup>5</sup>            | 10 <sup>5</sup>                                 |   |
| Brome     | a : 2.5<br>b : 1-8<br>c : 65                       | 5 (1-10)                                  | 15<br>non déterminé<br>peu toxique                             | non déterminé<br>peut s'opposer à Cl ou I<br>Br <sup>-</sup> peu toxique ; Br <sub>2</sub> hautement toxique                 | 460   | 10 <sup>6</sup>                  | 10 <sup>6</sup>                                 | 10 <sup>2</sup>                           |
| Cadmium   | a : 0.2<br>b : 0.03-3<br>c : 0.00011               | 0.06 (0.01-7)                             | 10.2-0.8<br>non déterminé<br>toxique                           | non déterminé<br>toxicité modérée à élevée   | 4<br>accumulation dans les reins              | 10 <sup>7</sup>                  | 10 <sup>7</sup>                                 | 10 <sup>2</sup>                           |
| Chrome    | a : 100<br>b : 10-100<br>c : 0.00005               | 100 (5-3000)                              | (0.2-1.0)<br>non déterminé<br>modérément toxique               | déterminé à 7<br>peu toxique   | 2   | 2 x 10 <sup>8</sup>              | 10 <sup>7</sup>                                 | 10 <sup>5</sup>                           |
| Cobalt    | a : 25<br>b : 1-20<br>c : 0.00027                  | 8 (1-40)                                  | (0.05-0.5)<br>déterminé à < 0.02 pour les légumes              | déterminé à 0.07 pour les ruminants<br>peu toxique   | 0.03, élevé dans le foie                      | 5 x 10 <sup>7</sup>              | 10 <sup>6</sup>                                 | 10 <sup>4</sup>                           |
| Cuivre    | a : 55<br>b : 5-65<br>c : 0.003                    | 20 (2-100)                                | déterminé à 2-4<br>normale 4-15<br>toxicité à > 20             | déterminé à 1-10, dépend de Mo<br>peu toxique  | 100   | 4 x 10 <sup>8</sup>              | 10 <sup>6</sup>                                 | 10 <sup>3</sup>                           |
| Fluorine  | a : 625<br>b : 250-750<br>c : 1.3                  | 700 (30-300)                              | non déterminé<br>normale 2-20<br>toxique à > 50                | non déterminé<br>bénéfique pour os et dents<br>toxicité racée  | 35-1000 ppm dans les os                       | 8 x 10 <sup>6</sup>              | 10 <sup>6</sup>                                 | 10 <sup>4</sup>                           |

COMPARAISON DE LA CONCENTRATION MOYENNE DES ELEMENTS EN TRACES  
DANS L'EAU DE DISTRIBUTION PUBLIQUE DANS DES VILLES D'U.S.A. ET DE LA COMMUNAUTE  
EUROPEENNE

| Eléments  | Concentration en $\mu\text{g/l}$ |        |
|-----------|----------------------------------|--------|
|           | Communautés européennes          | U.S.A. |
| Aluminium |                                  | 73     |
| Arsenic   | 0,9                              |        |
| Antimoine |                                  |        |
| Baryum    |                                  | 37     |
| Beryllium | 0,2                              |        |
| Bismuth   |                                  |        |
| Bore      | 120                              | 29     |
| Cadmium   | 1,1                              |        |
| Chrome    | 2,0                              | 0,6    |
| Cobalt    | 3,6                              |        |
| Cuivre    | 50                               | 4,8    |
| Fer       | 130                              | 39     |
| Plomb     | 15                               | 3,5    |
| Lithium   | 8                                | 1,8    |
| Manganèse | 24                               | 4,8    |
| Mercury   | 0,21                             |        |
| Molybdène | 0,1                              | 1,3    |
| Nickel    | 6                                | 2,5    |
| Rubidium  |                                  | 1,0    |
| Selenium  | 0,6                              |        |
| Argent    |                                  | 0,21   |
| Strontium |                                  | 100    |
| Etain     |                                  |        |
| Titane    |                                  | 1,4    |
| Uranium   |                                  | 0,15   |
| Vanadium  | 3,6                              | 1,0    |
| Zinc      | 110                              |        |



(2)

**REACTIONS DES CORPS CHIMIQUES DANS L'EAU**

|                   |  |
|-------------------|--|
| Chimiques         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réactions avec l'eau<br/>Hydrolyse</li> <li>- Charges spontanées<br/>Isonérisation (surtout pour compos. organ.)</li> <li>- Interaction<br/>Association</li> <li>- Réactions avec organiques<br/>Chélation</li> </ul> |
| Physico-chimiques | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Phénomènes surfaces<br/>Adsorption</li> <li>- Phénomènes électrochim.<br/>Changement charge</li> <li>- Photochimiques<br/>Photolyse</li> </ul>  |
| Physiques         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité</li> <li>- Taille</li> <li>- Couleur</li> </ul>   |
| Physiologiques    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicité<br/>Synergisme</li> <li>- Biodégradabilité<br/>Auto-épuration des cours d'eau</li> </ul>   |

COMPOSITION ELEMENTAIRE MOYENNE EN ELEMENTS EN TRACES  
DE L'EAU DE RUISSELLEMENT (ppm)

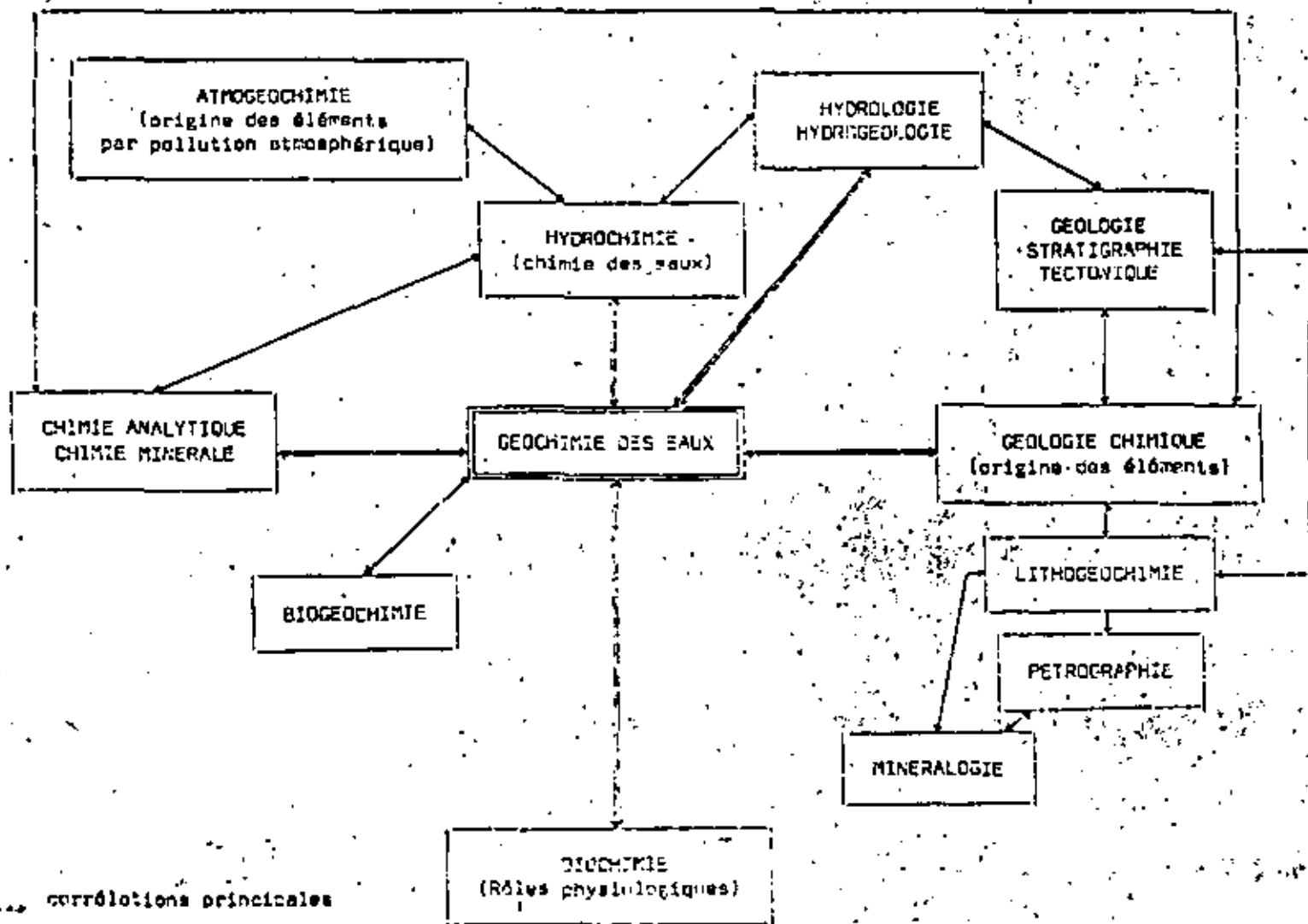
D'après BOVEN (1968)

|                                   |           |                                  |                         |
|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-------------------------|
| Ag                                | 0,00013   | I                                | 0,002                   |
| Al                                | 0,24      | K                                | 2,3                     |
| Ar                                | 0,6       | Li                               | 0,0011                  |
| As                                | 0,0004    | Mg                               | 4,1                     |
| Au                                | < 0,00006 | Mn                               | 0,012                   |
| B                                 | 0,013     | Mo                               | 0,000035                |
| Be                                | 0,054     | N(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | 0,73                    |
| Ba                                | 0,001     | Na                               | 6,3                     |
| Br                                | 0,0021    | Ni                               | 0,01                    |
| C(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | 11        | P                                | 0,005                   |
| Ca                                | 15        | Pb                               | 0,005                   |
| Cd                                | 0,08      | Re                               | 3,9 · 10 <sup>-10</sup> |
| Cl                                | 7,6       | Rb                               | 0,0015                  |
| Co                                | 0,0009    | Rn                               | 1,7 · 10 <sup>-15</sup> |
| Cr                                | 0,00018   | S                                | 3,7                     |
| Cs                                | 0,0002    | Se                               | < 0,02                  |
| Cu                                | 0,01      | Si                               | 6,5                     |
| F                                 | 0,08      | Sn                               | 0,00004                 |
| Fe                                | 0,67      | Sr                               | 0,08                    |
| Ga                                | < 0,001   | Th                               | 0,00002                 |
| Hg                                | 0,00008   | Tl                               | 0,086                   |
|                                   |           | U                                | 0,001                   |
|                                   |           | V                                | 0,001                   |
|                                   |           | Zn                               | 0,01                    |
|                                   |           | Zr                               | 0,0026                  |



| Constituants                   | Ruisseau | Mer    |
|--------------------------------|----------|--------|
| Cl <sup>-</sup>                | 7.8      | 19 000 |
| Na <sup>+</sup>                | 6.3      | 10 500 |
| Mg <sup>++</sup>               | 4.1      | 1 300  |
| SO <sub>4</sub> <sup>==</sup>  | 11.2     | 2 650  |
| K <sup>+</sup>                 | 2.3      | 350    |
| Ca <sup>++</sup>               | 15       | 400    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>==</sup> | 58.4     | 140    |
| SiO <sub>2</sub>               | 13.1     | 6      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 1        | -      |
| Fe                             | 0.67     | -      |
| Br <sup>-</sup>                | -        | 65     |
| CO <sub>3</sub> <sup>==</sup>  | -        | 18     |
| Sr <sup>++</sup>               | -        | 8      |

COMPOSITION CHIMIQUE (MAJEURS) DE L'EAU DE SURFACE ET DE  
LA MER (ppm)



International Conference of heavy metals on the Environment, Toronto, September 1975

Seven thoughts on Heavy Metal Research - John V. LAGERWERFF

Abstract

1° Each case of environmental contamination is unique and requires a specific research design. There is no standard approach, although there may be standard techniques applicable to the approach eventually decided upon.

2° It is unwise to examine tolerance of animals or plants or exchange behavior of soil with regard to heavy metals under conditions in which these metals are adjusted to unrealistically high concentrations. This is because the exposure of living systems to such high concentrations triggers responses which may differ not only in degree but also in kind from responses at lower concentration levels.

3° Even where one operates at heavy metal concentration levels which, though unusually high, are not altogether unrealistic, it is well to remember that while acute, overwhelming contamination are spectacular because of both the damage they cause and the type of reporting to which they lead themselves, the chronic, low-level type of creeping contamination may ultimately be viewed as the more pernicious one.

4° We should realize that we may cause a chain reaction by adding an excess of any one element or compound to a living system. To properly understand the imbalance thus brought about, we must also consider elements or compounds other than those we believe to be excessive. Single element toxicities do not usually exist because of the interlocking multilateral nature of enzyme systems and catalytic processes at the cellular level. This creates problems, but it also increases alternatives for abatement.

5° Our increasing awareness that the organic matrix in which heavy metals frequently occur in nature determines their impact on biological systems should not tempt one to study exclusively simulation-type systems in which these natural organic compounds have been replaced by unrelated synthetic compounds. Such a policy would leave unexamined the dynamic impact of heavy metals on - the synthesis of the natural compounds - their biodegradability.

From the latter may depend the (re)mineralization of heavy metals into pathologically active agents.

6° The heavy metal problems we face in preserving environmental quality are highly complex. Their study often pertains to processes in which time is an essential factor. Since there is no true substitute for this factor, we should allow for this time input in full measure, especially when efforts are directed towards improving the long-term future of the human milieu.

7° With few exceptions, progress in heavy metal research is strongly dependent on advances in analytical instrumental technology. While the progress in this field has been truly impressive, the resulting information explosion should not be abused by arousing public apprehensions to generate funds. It is also this new understanding should not be ignored to serve vested interests, nor minimized below a level dictated by a balanced interpretation of factual measurements that must be based on control (background) data.



- ALLAWAY (1972)  
"Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements"  
Adv. Agronomy (U.S.A.), 20, 235-74
- ALLAWAY, DAVIES (1971)  
"Heavy metal content of plants growing on soils contaminated by Pb mining"  
J. Agric. Sc., 76, 221-23 (U.K.)
- ALLAWAY, DAVIES (1971)  
"Trace elements content of soils affected by base metal mining in water"  
Geoderma, 5, 197-204
- Anonymous (1974)  
"Geochemistry and the environment"  
National Acad. of Sc.
- Anonymous (1975)  
"Les micropolluants minéraux dans les eaux superficielles". n° 1 du 10.  
Bureau national inf. scient. techn. (I.N.R.S.T.) Paris et Assoc. fr. pour  
l'étude des eaux
- ASTON, THORNTON et al (1975)  
"Dis in stream sediments and waters of South England"  
The science of envir., 4, 347-356
- BEFFERT, BERT, BOUQUETIE (1965)  
"Filtration de Pb par la matière organique extraite de la terre"  
NORM, série géochimique, n° 1
- BLADY (1976)  
"Toxic effects of Cr<sup>6+</sup> on brook trout"  
Water Research, 10, 497-500
- BIGNON J. (1974)  
"Effets biologiques des polluants particulaires inorganiques"  
12<sup>ème</sup> congrès national de la tuberculose et des maladies respiratoires,  
Clément-Farland, Masson Edis., p. 207
- BIGNON J., SEBASTIEN P., JAURAND M.C., HEM B. (1974)  
"Microfiltration method for quantitative study of fibrous particles in  
biological specimens"  
Environ. Health Perspect., 9, 155-160
- BIGNON J., SEBASTIEN P., BOURGARD G. (1975)  
"Le risque carcinogénique actuel"  
Néoplasme et hygiène, n° 1146, 674-677
- BERGOND, BRUNIER (1972)  
"Epidemiological study of arsenicism in the city of Antiocheste"  
in "Trace substances ...", vol. V, pp. 13-14
- BOUCHTA H., BRITSCHE J., GUYARD J. (1972)  
"Utilisation de l'AA. pour l'analyse des eaux"  
Assoc. Pharmaceutique Franç. pour l'Hydrologie, 2, pp. 57-61

DOWEN, H. (1968)  
"Trace elements in Biogeochemistry"  
Acad. Press N.Y.

BRIDLEY (1975)  
"Reduction of Mo by a thermophillic bacterium"  
in "Int. Conf. of heavy metals in the environment", Toronto, octobre

DUCKET G., BIGNON J., BONIFANT G., ROY J. (1974)  
"Incidence sur la santé de la pollution atmosphérique par l'arsenic ou  
autres particules fibreuses"  
Rev. Tuberc. Pneumol. (Paris), 35, 461-478

BURKITT (1977)  
"Distribution of heavy metals in the vicinity of an industrial complex"  
Nature, 230, 327-328

USKOFF, H., 1970, n. (1971)  
"Environmental geochemistry in health and disease"  
Geol. Soc. America, Memoirs n° 123

FRANZ H. (1975)  
"The geochemical environment as related to cancer"  
in "Int. Conf. of heavy metals in the environment", Toronto, octobre.

CARLILLAS, R. (1976)  
"The ionic potential"  
J. Amer. Chem. Soc. 98, 2855-2872

LAYE (1975)  
"Etude des particules solides en suspension dans une eau minérale"  
B.R.G.M., confidentiel

CHAU, WING et al (1975)  
Science, 192, 1130-31

CLAYTON et al (1975)  
"Water hardness and CV mortality in England and Wales"  
in "Durée de l'eau potable et santé publique", Commission des Communautés  
Européennes, Div. Environnement, Luxembourg, mai 1975

CUNNOR, SHACKLETT (1971)  
"Extraordin. trace element accumulation in rodent's cells"  
U.S.G.S., Prof. Paper 750-D, pp. 151-56

DENNINGHAM, GONCHAREN (1973)  
"Biological absorption of asbestos fibres"  
Journal of ACAC, 50, 976-981

FAIRBRIDGE (1972)  
"The encyclopedia of geochemistry and environmental sciences"  
Van Nostrand etc.

FISHER, CHONG et al (1975)  
"Fly ash collected from electrostatic precipitators, microanalytical  
structure"  
Science, 190, 160-165

FRICOURG, VIGAL (1972)  
"Hg in the environment"  
C.R.C. Press

FRICOURG, PISCATOR, HOPFSTEG (1974)  
"Cd in the environment"  
C.R.C. Press

GARNIER (1972)  
"Usage du F dans les eaux souterraines en France"  
Univ. L. Pasteur, ICR Oecologie, Strasbourg

GIBBS, R. (1973)  
"Mechanism of trace metals transport in rivers"  
Science, 180, pp: 71-73

GONI, BIGNON et al (1974)  
"Les oxydes, leurs sources sur l'environnement et sur la santé"  
Pollution et environnement, journal, Paris

GRIFF J., JENSEN G., HENRIK G., HILTON J., MORGAN S. (1974)  
"Identification and localization of trace particles in natural and  
polluted biological systems by electron spectroscopy of X-ray spectra"  
In: Abstracts symposium environmental contamination, 20-28 June, p. 252

GRIFF J., HENRIK G., HILTON J., JENSEN G., MORGAN S., MURPHY P.,  
MURPHY J. (1976)  
"Les poussières dans la pollution atmosphérique. Colloque de Paris  
Vers les agences de l'air"  
Pollution et environnement, avril 1976

HANFORD, SHACKLETT et al (1971)  
"Elemental composition of surficial materials in the contaminated  
United States"  
U.S.G.S. Prof. Paper 574-D

HELZ (1970)  
"Trace elements inventory for the northern Chesapeake Bay with emphasis  
in the influence of man"  
Geoch. Cosmoch. Acta, 40, 573 -

HEM, J. (1970)  
"Study and interpretation of characteristics of natural water"  
U.S.G.S. Water supply paper 1473, Washington

HEM, J. (1973)  
"Geochemical controls on Pb concentrations in stream water and  
sediments"  
Geoch. Cosmoch. Acta, 40, 583 -

HERRILL (ed.)  
"Trace substances in environmental health"  
Univ. of Missouri, I (1967), II (1968), III (1968), IV (1969), V (1970),  
VI (1971), VII (1973)

IRBY et al (1975)  
"Bacterial mobilization of Cd"  
In "Geo-chem of heavy metals in the environment", Toronto, p. 110

"International conference on heavy metals in the environment" (1974)  
Toronto, 27-31 octobre

JONES, H. (1971)  
"Hg pollution control".  
Noyes Data Corp. New Jersey, 250 p

JONES, PRASAD (1974)  
"Biodegradability of photo-degraded polymers" I et II  
Env. Science and Techn., 8, n° 10, pp. 919-925

KABACK (1976)  
"Transport of Pb in mountainous streams, Color"  
Geoch. Cosmoch. Acta. 40, 581 +

KEY (1972)  
"Occupational exposure to Pb"  
U.S. Dep. Health Educ. Welfare

KEY (1972)  
"Occupational exposure to Cu"  
U.S. Dep. Health Educ. Welfare

KIYAMA, Y. (1975)  
"Geochemistry of water"  
J.W. and sons N.Y.

KOBAYASHI J. (1972)  
"Air and water pollution by Cd, Pb, Zn"  
in "Trace substances ...", vol. V, pp. 117-128

KOTHNY, E. (1975)  
"Trace elements in the environment"  
A.C.S. Series 123, Wash.

KRAUSKOPF (1971)  
"Geochemistry of micronutrients"  
Micronutrients Agric. Soc. Symp.

LAWRENCE, TOSINE (1975)  
"Removal of asbestos fibres from potable waters"  
Water Research, 9, 397-400

LEVY, STEINSON et al (1976)  
"Investigating possible effects of asbestos in city water ..."  
Amr. J. Epidemiology, 103, 362-366

LOURIA, BROUWER (1972)  
"The human toxicity of certain trace elements"  
Ann. of Intern. Medicine, 76, n° 2, 307-315

MIESCH (1970)  
"Geoch. Survey of Missouri"  
U.S.G.S., Inv. Missouri (Denver Center)

MILLS (1976)  
"Trace element metabolism in cats"  
Livingstone Ed. Edinburgh



NICHOLSON (1974)  
"Analysis of amphibole asbestosiform fibers in municipal water supplies"  
Environ. Health Perspectives, 9, 165-172

"Oligoéléments en France" (1970).  
Ann. Agronom. 21, n° 5, 659-692.

PATTISON (1970)  
"As and water pollution hazard"  
Science, 170, 870-8

RATNADORTHY-RUST (1975)  
"Hg sorption and desorption characteristics of some Ottawa rivers  
sediments"  
Canadian J. of Earth Sc., 13, 530-36

SEBASTIEN P., BIGNON J., BONI J. (1973)  
"Application de la microdiffraction électronique à l'identification  
minéralogique des particules inhalées"  
J. Microsc., 17, 17a

SEBASTIEN P., BIGNON J., BERNARD G. (1975)  
"La pollution atmosphérique urbaine par l'arsenic"  
Journées d'étude sur la toxicologie industrielle, Paris, 2-4 juin

SHACKLETT, JAMES S. MISCHE (1970)  
"Geochemical environ. and cardiovascular mortality rates in Canada"  
U.S.G.S. Prof. paper 574 C

SIFFERT, B. (1962)  
"Quelques réactions de la SiO<sub>2</sub> en solution : la formation des gels"  
SCGAL n° 21, Strasbourg

SMITH et al (1975)  
"Minerals"  
Alaska Sensorium Book, N.Y.

SOVERI, J. (1973)  
"On the interdependence of the pollution of air, soil and water in  
N. Finland"  
Conv. Int. Acqua Mediterranea, Palermo, pp. 635-642

SPEIL (1974)  
"Chrysotile in water"  
Environ. Health Perspectives, 9, 151-153

SUDREAU, J. (1974)  
"Etude expérimentale de la délamination de la calcite"  
Thèse Or Univ. Paris

THORNTON, MERRILL et al (1972)  
"An investigation into copper deficiency in cattle"  
J. Agric. Sci., 78, 157-163

THORNTON, MERRILL et al (1975)  
"Geochemical studies in several rivers and estuaries used for oyster  
rearing"  
The Science of the total environment, 5, 375-345



VANLIGCKE, SORGER et al (1975)

"Soil and groundwater contamination by oil spills"  
Int. J. Environmental studies, 2, 99-111

VOORS, A. (1971)

"Minerals in the municipal waters and atherosclerotic heart death"  
Amer. Journ. of epidemiology, 93, n°4, pp. 259-265

WITTEMORE (1974)

"Ferric oxyhydroxide microparticles in water"  
Envir. Health Perspectives, 9, pp. 173-176

WONG-DIAN (1975)

"Methylation of Pb and Se in the environment"  
in "Int. Conf. heavy metals in the environment", Toronto, octebra



DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

NOTAS

COMPLEMENTARIAS

MARZO 1982

11/11/11

# La géochimie en exploration minière

par F. CACHAU

Ingénieur géologue

Division des mines métalliques

Société nationale Elf-Aquitaine (Production)

La prospection géochimique, après 20 ans de mise en œuvre et de mise au point apparaît aujourd'hui comme un maillon incontesté d'une exploration minière structurée des petites aux grandes échelles. « Prospection stratégique », « prospection factique » sont largement utilisées.

Les principaux perfectionnement concernent actuellement l'introduction de l'analyse multélément, susceptible de larges retombées en matière de cartographie géologique. La couverture systématique de vastes surfaces devra amener une grande quantité d'informations nouvelles, de techniques d'interprétation et finalement de connaissances insoupçonnées aujourd'hui.

## 1. — QU'EST-CE QUE LA GEOCHIMIE ?

La géochimie s'est développée tardivement en discipline autonome, est surtout depuis les trente dernières années en France et en Occident. Pourtant sa définition paraîtrait évidente : ensemble des faits et processus chimiques dans les sciences de la terre.

Dans le détail, en fait, les limites du domaine n'apparaissent pas toujours de manière très tranchée : ainsi le géologue qui identifie un granite, roche contenant des proportions définies des éléments ou de leurs composés minéralogiques fait déjà œuvre de géochimiste sans le savoir, tandis que cette spécialisation est reconnue sans hésiter à celui qui relève des teneurs d'éléments traces dans une formation géologique. Où est la différence ?

Sur le plan des processus géochimiques, l'ambiguïté est moindre. Ainsi les notions de « géochimie des formations superficielles », resteront sans ce

current, tandis que la géochimie des roches cristallines sera plutôt « pétrologie », la géochimie des gîtes minéraux sera historiquement précédée par « métallogénie » ou « géologie » qu'elle inclut pourtant.

En matière d'exploration minière la même dichotomie apparaît :

- Géochimie descriptive, d'observation appuyée sur des déterminations de laboratoire, dépeignant la répartition à différentes échelles des éléments (traces ou non) dans les formations géologiques en liaison avec l'existence et l'évolution des gîtes minéraux.
- Géochimie interprétative appuyée sur les descriptions précédentes, tentant de les reclasser et de suggérer des modèles de mise en place, de distribution, de destruction des concentrations minérales.

Remarquons que l'on retrouve ici une distinction parallèle à celle qui existe déjà entre métallo-

génie et géologie, et qu'il n'est pas inutile de garder en mémoire certaines difficultés historiques qui ont amené à cette distinction : à vouloir trop tôt formuler des modélisations que n'appuyeraient pas des observations suffisamment nombreuses pour être statistiques, — ou à tout le moins vraisemblables — on risque fort de procéder à des constructions sans rapport avec la réalité.

La géochimie des processus métallogéniques que l'on voit se créer depuis quelques années a trop conscience du danger de tels raisonnements bâtis sur des informations fragmentaires, pour ne pas l'éviter, mais c'est au risque inverse de rester trop longtemps descriptive en se limitant à un catalogue de données multipliées sans que l'on entrevoie leurs généralités, leurs lois et, partant, leurs causalités.

Du bon équilibre de ces deux tendances peut seul résulter leur développement harmonieux et beaucoup reste à faire dans ce domaine : c'est surtout de géochimie descriptive qu'il sera question dans les pages qui suivent.

## 2. — PLACE DE LA GEOCHIMIE DANS UNE « ARCHITECTURE DES METHODES D'EXPLORATION »

Comme toutes les technologies, celle de la prospection minière a largement évolué au cours des 50 dernières années. La sophistication des méthodes d'une part, et la constitution de groupes miniers puissants capables de mettre en œuvre de tels moyens onéreux d'autre part, ont conduit à un partage en deux attitudes différentes, sinon opposées :

• Une attitude traditionnelle, apparentée à un mode de pensée linéaire, et adaptée à des moyens modestes : les prospectifs sont recherchés et trouvés par des individus qui mettent en œuvre les méthodes de la reconnaissance minéralogique. L'indice découvert est généralement étudié sur le champ et valorisé au mieux, soit par l'inventeur lui-même, soit après cession à des groupes miniers.

En cas d'échec, et selon la situation financière, l'itinéraire est repris jusqu'à une meilleure chance.

Le caractère linéaire de la démarche apparaît aussi à l'échelle du suivi de l'indice qui est exploré, de proche en proche, par des méthodes de détail.

Il faut remarquer que cette méthode garde toute son efficacité en pays neuf, sous-exploré, surtout si l'on considère l'ensemble des individus qui la pratiquent : la rémunération attractive des rares découvertes permet seule de compenser les nombreux cas inévitables de ruine, en l'absence de péréquation d'un risque essentiellement élevé, et d'attirer suffisamment de nouveaux joueurs.

• Une attitude structurée, apparentée à un mode de pensée global, et procédant d'un raisonnement « du général au particulier ». La recherche consiste alors à sélectionner, en un certain nombre de phases, des « superficies décroissantes d'intérêt croissant ».

Le premier choix est alors généralement géologique : « dans tel type de terrain, tel type de minéralisation est susceptible d'exister ». L'absence de spécificité de ce premier critère conduit à des superficies initiales importantes (plusieurs milliers de kilomètres carrés) que seules des méthodes peu onéreuses d'exploration pourront permettre d'explorer sans risquer de dépenser des sommes d'argent (ou des quantités de travail) plus importantes que l'espérance de rémunération de la découverte indispensable pour tenter de nouvelles aventures.

C'est le domaine des méthodes aéroportées, géophysiques essentiellement. Elles permettent de sélectionner comme « plus favorable » (c'est-à-dire à plus haute probabilité de succès) des zones plus réduites où l'on peut consentir des méthodes plus spécifiques, mais plus onéreuses.

Un premier rapport de réduction de l'ordre de 10 à 1 permet ainsi, à budget égal, de mettre en œuvre des méthodes 10 fois plus coûteuses par unité de surface dans des zones de plusieurs centaines de kilomètres carrés. C'est par exemple le domaine de la géochimie « stratégique », destinée à localiser les cibles minières sans les décrire.

Puis, dans une deuxième phase de réduction, les superficies kilométriques sélectionnées feront l'objet de descriptions précises, géologiques, géophysiques, géochimiques, permettant de localiser des indices minéralisés et, d'inférer des modèles d'extension en profondeur que l'on testera, comme des hypothèses par des sondages.

Les méthodes géochimiques d'exploration précèdent beaucoup plus de la seconde démarche que de la première sauf exceptions très spécifiques. D'où l'opportunité de les distinguer, de les insérer consciemment dans un programme structuré, sans lacune technologique, risquant de conduire à une belle anomalie que l'on ne sait pas





explorer, et sans lacune budgétaire risquant de conduire à une opération qui a coûté, avant le premier sondage, une fraction significative de la marge de profitabilité du gîte espéré : autrement dit à la ruine du joueur.

### 3. — METHODES GEOCHIMIQUES EMPLOYEES DANS DES CAMPAGNES D'EXPLORATION GLOBALES

• Niveau régional : c'est la grande lacune. Seule la recherche des porphyry-copper, qui est la plus facile à ce niveau, parce que la cible y est la plus large, peut-être pratiquée par prélèvement de sédiments dans les vallées (stream sediment)

sur des superficies de quelques milliers de km<sup>2</sup>. En fait, dans ce cas, l'absence de méthode aéroportée très efficace conduit à reporter sur le niveau stratégique le budget que l'on affecterait à la première phase, tandis que la dimension de la cible permet d'élargir la maille, à près de 1 km<sup>2</sup> par point de prélèvement, de sorte que le bilan global finit par être acceptable.

Par contre, les méthodes dites « géochimie régionale », et consistant à prélever des échantillons de sédiments tous les 4, 5 ou 10 km ne permet d'identifier que d'anciens travaux ou des formations géologiques ; elle est pratiquée surtout par certains organismes officiels dans le but de publier des atlas géochimiques. Son emploi ne doit pas faire illusion, en matière d'exploration minière.

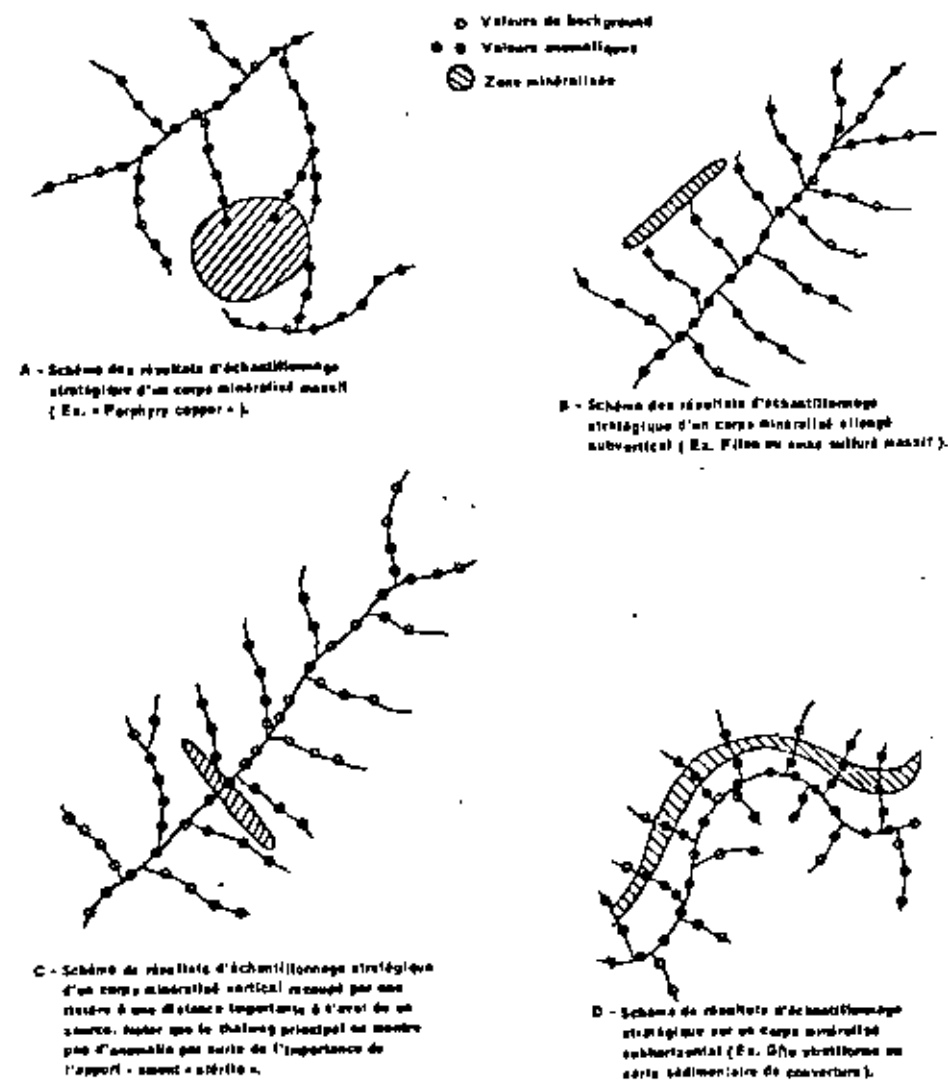
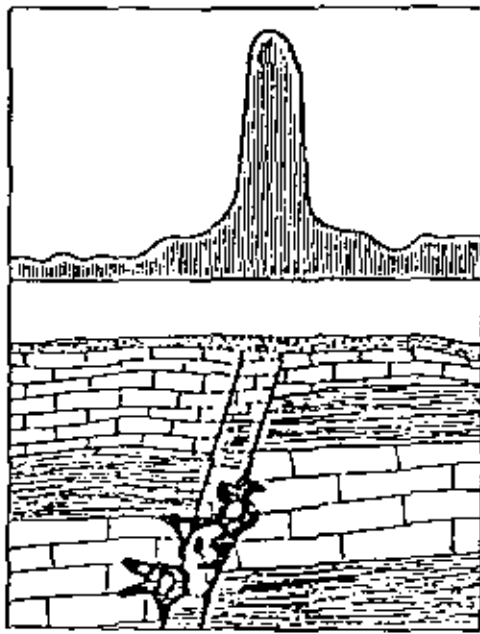


Fig. 1 — Exemples d'aureoles de dispersion secondaire dans différents cas d'anomalies :

- A : Cible de type porphyry copper
- B et C : Corps filamentaires verticaux
- D : Corps stratiforme



Minéralisation — Teneurs à 20 cm de profondeur  
Faittes

Fig. 2. — Exemple d'image géochimique d'anomalie de fuite.

(d'après GRANIER 1973)

♦ Niveau stratégique : la méthode des prélèvements en « stream sediment » est la méthode la plus répandue. Il convient de noter qu'elle n'est pas la seule. Il peut exister, dans certains cas particuliers, des conditions géologiques, topographiques ou de disposition de la minéralisation justifiant des prélèvements en sol à large maille, ou des prélèvements sur lignes de crête, mais ces cas restent rares.

En général, la méthode des prélèvements en « stream sediment » repose sur l'analyse directe des éléments prospectés pour rechercher une minéralisation affleurante : quand on prospecte le cuivre, il est toute de même préférable de rechercher les auréoles de dispersion du cuivre (fig. 1).

Parfois, la prospection stratégique peut être plus sophistiquée : recherche d'anomalie de fuite au-dessus de corps minéralisés à disposition horizontale (fig. 2), recherche de halos d'indicateurs secondaires autour de minéralisations non affleurantes (fig. 3). Dans ces cas, l'avantage de la recherche directe disparaît, et la fiabilité de la méthode diminue d'autant. Ces méthodes ne seront donc utilisées que pour résoudre des problèmes spécifiques.

• Niveau tactique : la méthode classique est celle des prélèvements en sols, à profondeur variable selon que l'objectif visé est la description globale d'une anomalie (horizons superficiels) ou la localisation précise de son origine (horizons

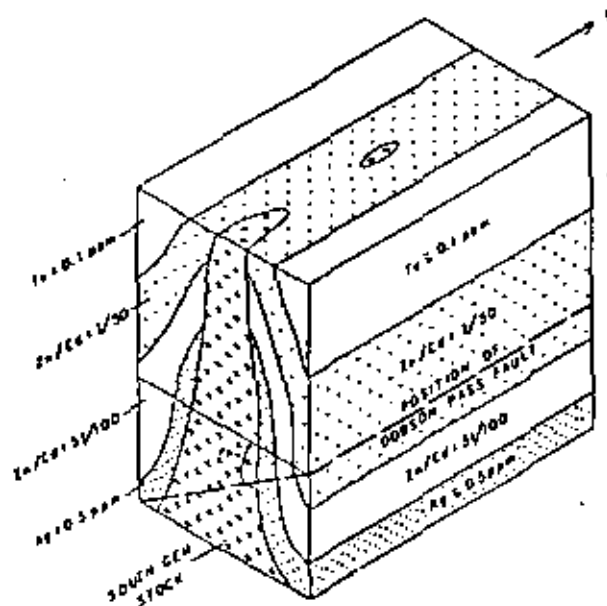


Fig. 3. — Exemple de halos d'auréoles primaires autour d'intrusions acides

(BOTBOL et al 1973)

profonds, roches). Cette méthode classique peut être considérée comme parvenue au stade de l'exploitation de routine. Encore convient-il que ses utilisateurs la pratiquent suffisamment pour parvenir à dépasser le seuil minimal d'efficacité des débuts.

#### 4. — FIABILITE DES METHODES GEOCHIMIQUES

• Les méthodes de routine : géochimie des sédiments de ruisseaux, géochimie des sols, peuvent être considérées comme utilisables couramment. Leurs limites d'utilisation sont bien connues. Encore est-il préférable qu'un géochimiste expérimenté précise la possibilité de leur emploi, les conditions d'exécution, maille, profondeur de prélèvement, informations à relever sur le terrain. Il est bon qu'il soit intégré à l'exécution de la campagne, et prenne la responsabilité de l'interprétation des résultats y compris celui de l'adaptation des réponses aux questions posées (fig. 4).

• Les méthodes en développement : le plus souvent, il s'agit d'appliquer les méthodes classiques, sol, stream sediment notamment, dans le cas d'élé-

ments nouveaux. En effet, les méthodes relatives aux éléments des minerais métalliques les plus couramment recherchés ont été les premiers mis au point en prospection géochimique (plomb, zinc, cuivre, nickel, cobalt, tungstène, molybdène, etc...).

Les méthodes de dosages ont évolué dans le sens d'une meilleure précision pour aboutir, en général, à un stade de très bonne fiabilité, sauf problèmes isolés. Par contre, des éléments à très faible teneur (or, argent, cadmium, mercure, niobium, tantale, terres rares, platine, etc...) qui étaient pratiquement inaccessibles aux méthodes chimiques colorimétriques, deviennent dosables à des teneurs du niveau du ppb ( $10^{-9}$ ) par des méthodes plus sensibles combinant les possibilités des techniques les plus modernes. Les recherches de développement s'orientent donc dans cette direction, et le problème y est alors purement analytique.

Parallèlement, on peut aussi développer les méthodes indirectes, soit pour améliorer leur fiabilité, soit pour étendre le champ d'action : amélioration de la sélectivité dans la recherche des anomalies de fuite, en vue de les discriminer du « bruit » constitué par le fond de teneur des formations affleurantes, extension des méthodes basées sur les éléments indicateurs à des contextes originaux, etc...

#### 5. — PRINCIPES DE BASE DE LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE

Ils sont simples :

• des concentrations faibles mais généralement décelables par des méthodes analytiques sensibles, existent, pour tous les éléments naturels dans toutes les formations rocheuses. Selon les cas, ces teneurs seront de l'ordre du « pour cent » (éléments majeurs), du « pour million » (ppm) (éléments-traces) ou du « pour milliard » (ppb) (éléments infra-traces). Ces teneurs présentent des variations selon la nature géologique des formations, et on donne à leur valeur moyenne locale le nom de « background » ou « teneur de fond locale » (1).

(1) La notion de « Clarke » est différente. Il s'agit d'une estimation à l'échelle du globe terrestre, par le jeu de teneurs moyennes par formations pétrographiques, pondérées par des coefficients estimés à partir de considérations de fréquence de l'occurrence de ces faciès. Etablie par Clarke, cette moyenne est unique par définition.

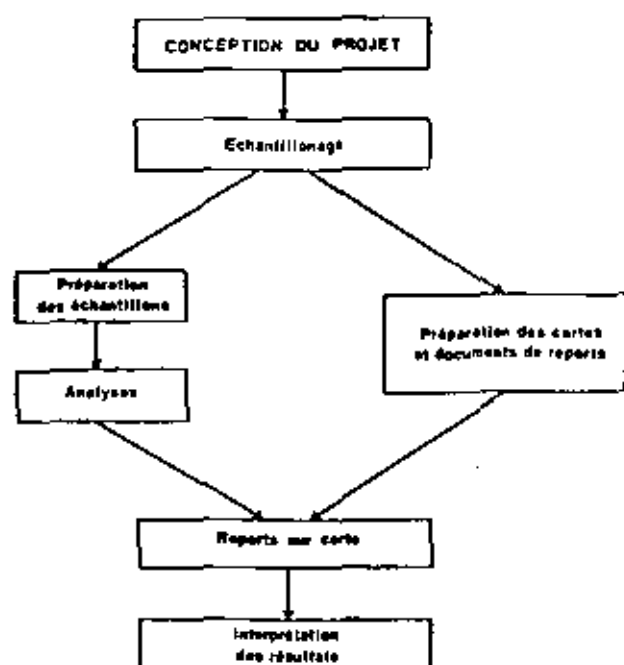


Fig. 4. — Séquence des opérations élémentaires d'une campagne de prospection géochimique.

- ces teneurs présentent aussi des variations plus accusées, en fonction de contextes locaux, qui aboutissent occasionnellement à des accumulations telles que la formation géologique devient exploitable dans un cadre économique donné. Il existe tous les intermédiaires de taille entre ces concentrations exploitables et celles qui ne le sont pas, et ces dernières peuvent constituer d'importantes réserves potentielles disponibles pour l'avenir, même si leur étude est souvent différée.

- le raccordement spatial entre le minerai d'un gisement et les roches banales qui l'entourent peut se faire de façon rapide ou transitionnelle : il peut exister une auréole primaire de dispersion qui agrandit le gisement. Il peut aussi exister des zones successives de concentration d'éléments différents disposés en auréoles : c'est la zonalité des auréoles de dispersion primaire, éventuellement apparentée à la zonalité des auréoles d'altération hydrothermale ou à la zonalité des gisements d'éléments différents (fig. 3).

- les processus supergènes à leur tour sont dispersifs en général. Ils tendent à détruire l'état d'ordre que représente le gisement pour aboutir à un état de désordre maximum, avec zone de transition.

Il en résulte des auréoles de dispersion secondaire dont l'effet essentiel est d'élargir les dimensions des cibles minières, mais aussi de diminuer le contraste des teneurs. Ces auréoles peuvent être :

- de dispersion mécanique : fragmentation de grains minéralisés et mélanges successifs avec des grains stériles ;
- ou de dispersion chimique : passage des éléments en solution, vraie ou colloïdale, dans l'eau, entraînement, éventuellement fixation sur des composés organiques ou minéraux.

Dans les deux cas, la dispersion se fait en général suivant la pente et des phénomènes de reconcentration peuvent se produire soit au fond des ruisseaux, soit sur des accidents topographiques locaux. Il sera donc important de tenir compte de la morphologie des terrains et des phénomènes d'écoulement dans les prospections à maille géométrique, tandis que les mêmes phénomènes favoriseront la recherche, à maille lâche, en sédiments de ruisseau (= stream sediments) pour des gisements affleurants, c'est-à-dire des concentrations métalliques relativement fortes affectées par le cycle supergène. Par contre, les anomalies mettant en jeu un faible tonnage métal, telles que les « anomalies de fuites », seront mieux atteintes par des prélèvements les plus proches possibles de l'origine de l'anomalie.

Enfin, notons que la dispersion secondaire peut procéder d'autres phénomènes : entraînement par les glaciers de débris rocheux, incorporations à la moraine, et formation d'anomalies « glaciogéniques » très allongées parallèlement aux directions glaciaires : concentration chimique intense en pays tropical, liée aux phénomènes de pédogénèse et de latéritisation ; phénomène éoliens en pays désertique.

- selon la nature des éléments, la dimension de ces auréoles de dispersion secondaire varie considérablement. Certains éléments peu altérables (ex : tungstène, étain, chrome), surtout sous forme d'oxydes, conservent leur forme minéralogique dans les sols, puis dans les sédiments de rivière (scheelite, cassitérite, chromite). Ils sont alors accessibles aussi bien aux méthodes de reconnaissance de la minéralogie (prospection alluvionnaire) que de l'analyse (prospection géochimique) et les performances comparées de ces deux méthodes tiennent avant tout à une analyse de rapport signal/bruit, ici anomalie/background.

Au contraire, des éléments à paragenèse sulfurée se transforment en minéraux oxydés d'altération supergène ou de chapeaux de fer, puis suivent le devenir général en étant transportés sous forme solide, ou en solution, ou encore en alternance des deux. La finesse des réactions chimiques favorise une véritable séparation des éléments. Certains très mobiles vont très loin et donnent des anomalies aplaties mal discernables (exemple zinc, uranium). D'autres moins mobiles, restent en arrière et provoquent des anomalies plus pointues, mieux identifiables, mais dont la dimension plus faible nécessite une maille plus serrée pour les déceler (tableau I).

Une récente étude du BRGM et de la SNPA appuyée par la DGRST a montré le rôle important joué par les hydroxydes de fer, véritables fragments de chapeaux de fer distaux, dans cette migration des métaux de base (Cu, Pb, Zn) et le caractère essentiel mécanique de la dispersion de la scheelite.

Au total, la méthode géochimique d'exploration apparaît aujourd'hui comme bien établie, à côté d'autres méthodes qu'elle complète. Elle se voit mise en œuvre dans de nombreux pays, qu'ils soient de climat tempéré, les plus faciles, ou de climats arides, ou tropicaux, (dans ce cas l'intensité du lessivage favorise l'étalement des anomalies, ce qui compense la difficulté de l'observation géologique des roches altérées) ou encore de climats glaciaires, pour lesquels une véritable étude

TABLEAU 1  
 Mobilité relative des éléments en auréoles secondaires de dispersion  
 (d'après Levinson, 1974)

| Mobilités relatives | Conditions de milieu  |   |   |   |
|---------------------|---|---|---|---|
|                     | Oxydantes   | Acides  | Neutres à alcalines   | Réductrices   |
| Très grande         | Cl. I. Br<br>S. B   | Cl. I. Br<br>S. B   | Cl. I. Br<br>S. B<br>Mo. V. U. Se. Re   | Cl. I. Br   |
| Grande              | Mo. V. U. Se. Re<br>Ca. Na. Mg. F. Sr. Ra<br>Zn                       | Mo. V. U. Se. Re<br>Ca. Na. Mg. F. Sr. Ra<br>Zn<br>Cu. Co. Ni. Hg. Ag. Au | Ca. Na. Mg. F. Sr. Ra   | Ca. Na. Mg. F. Sr. Ra   |
| Moyenne             | Cu. Co. Ni. Hg. Ag. Au<br>As. Cd                                      | As. Cd  | As. Cd  | As. Cd  |
| Faible              | Si. P. K<br>Pb. Li. Rb. Ba. Be<br>Bi. Sb. Ge. Cs. Tl                  | Si. P. K<br>Pb. Li. Rb. Ba. Be<br>Bi. Sb. Ge. Cs. Tl<br>Fe. Mn            | Si. P. K<br>Pb. Li. Rb. Ba. Be<br>Bi. Sb. Ge. Cs. Tl<br>Fe. Mn                              | Si. P. K<br>Fe. Mn  |
| Très faible à nulle | Fe. Mn<br>Al. Ti. Sn. Te. W<br>Nb. Ta. Pt. Cr. Zr<br>Th. Terres rares | Al. Ti. Sn. Te. W<br>Nb. Ta. Pt. Cr. Zr<br>Th. Terres rares               | Al. Ti. Sn. Te. W<br>Nb. Ta. Pt. Cr. Zr<br>Th. Terres rares<br>Zn<br>Cu. Co. Ni. Hg. Ag. Au | Al. Ti. Sn. Te. W<br>Nb. Ta. Pt. Cr. Zr<br>Th. Terres rares<br>S. B<br>Mo. V. U. Se. Re<br>Zn<br>Cu. Co. Ni. Hg. Ag. Au<br>As. Cd<br>Pb. Li. Rb. Ba. Be<br>Bi. Sb. Ge. Cs. Tl |

des dépôts glaciaires est souvent nécessaire en complément (fig. 5).

## 6. — PROGRES RECENTS OU ESPERABLES

Si, malgré tout, certaines publications récentes de taux de succès de découvertes ne mentionnent pas très souvent la géochimie comme « la » méthode qui a trouvé « le » gisement, cela tient d'abord en grande partie aux conditions même de son emploi dans une combinaison structurée de techniques. En définitive, ce que le géologue minier recherche, c'est la stratégie la plus fiable ou la moins onéreuse, ou encore celle qui réalise le meilleur compromis coût/fiabilité, plutôt qu'une méthode miracle, unique qui permettrait de tout trouver. Largement employée, la géochimie n'en est pas moins perfectible.

Les progrès réalisés depuis quelques années ont surtout concerné le domaine analytique : augmentation du nombre des éléments analysés simultanément par l'emploi de la spectrométrie multiélémentaire et autres variantes. Cela a pour effet de multiplier les objectifs, à coût analytique égal,

et de récupérer, en sous-produit, un certain nombre d'éléments utilisables, plus dans un but cartographique que métallogénique. On aboutit alors à la notion de « signature géochimique », spectre des éléments avec leurs comportements particuliers, qui accompagnent une minéralisation ou une occurrence géologique en la caractérisant (Colloque Nancy 1977). Parallèlement, les techniques de traitement multiélémentaires ont dû largement évoluer : confronté avec une masse considérable d'éléments d'information le géochimiste doit améliorer son tri. Si le report cartographique de l'information brute reste essentiel à la bonne visualisation des résultats avant archivage, l'examen des corrélations entre ces données peut seul permettre de distinguer des familles : c'est le domaine des différentes formes d'analyses factorielles, de correspondances, des nuées dynamiques, destinées à explorer la structure d'espace à grand nombre de dimension. Parallèlement les techniques de la géostatistique, du krigeage, ont plutôt pour objectif de lisser des informations à forte variance aux petites échelles que sont les teneurs géochimiques dans les sols ou les alluvions des rivières. Ces techniques, loin d'avoir atteint leur stade ultime de perfectionnement, devront encore largement progresser, parallèlement avec les méthodes de représentation des résultats (fig. 6).

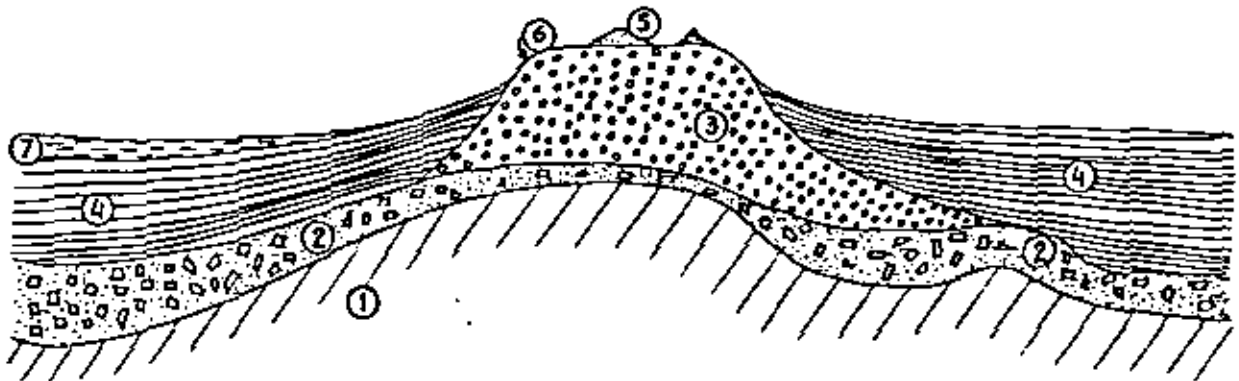


Fig. 3. — Un exemple des différentes formations superficielles rencontrées en climat glaciaire (Abitibi, Canada).

- ① Bed rock : il affleure très rarement.
- ② Moraine de base, compacte et omniprésente, favorable à la prospection géochimique, mais rarement accessible.
- ③ Esker : formations fluviales liées à la glaciation. Les éléments, sables et graviers, peuvent être considérés comme une moraine débarassée de son silt et, à ce titre, favorable à la prospection géochimique.
- ④ Argiles varvées, dépôts lacustres d'origine lointaine et homogénéisée, complètement défavorable à la géochimie.
- ⑤ Dunes.
- ⑥ Sels podsoliques très lessivés en surface.
- ⑦ Lac actuel.

La prospection géochimique pourra s'adresser aux formations ① ② ③ et ⑥, éventuellement ⑦. Remarque que l'esker ③ est placé topographiquement au-dessus, mais stratigraphiquement au-dessous des varves ④.

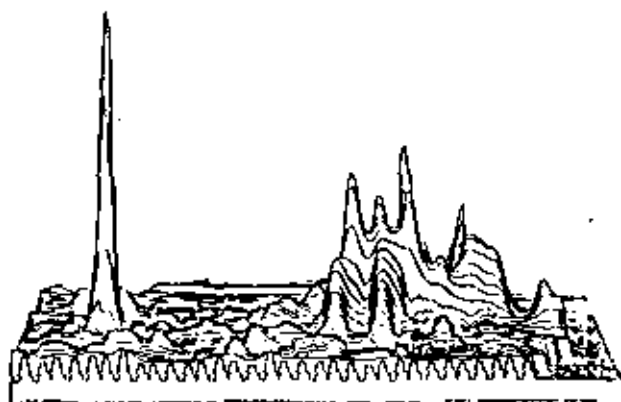


Fig. 6. — Représentation de teneurs géochimiques en maille régulière (sols) par bloc diagramme.

A côté de cette évolution qui concerne plus l'outil que la science elle-même, il reste malheureusement difficile, dès à présent, de prévoir quels progrès importants permettront de faire faire aux connaissances la cartographie systématique de régions entières, telle qu'elle commence à être pratiquée ; motivation économique première ; mais aussi retombée en matière de cartographie géologique ; mais encore meilleure connaissance des structures géochimiques régionales liées à un support géologique connu ou inconnu ; recherches nouvelles enfin induites par de telles descriptions.

Un effort de classification des informations à mesure de leur éclosion sera aussi nécessaire, si l'on veut éviter l'immense gaspillage que constituerait une description sans souci permanent de structurer les résultats obtenus, classification aux différentes échelles devant impliquer non seulement des industriels explorateurs mais aussi des fondamentalistes qui seuls sont susceptibles de valoriser certaines données sans incidence économique directe. Ce sera le nouveau défi de la géochimie des années 1980 ; il est encore plus difficile que celui posé par la cartographie géologique.

Parallèlement à ces progrès déjà largement entamés, une autre synergie apparaît depuis 2 ou 3 ans entre géochimie et minéralogie : loin de se concurrencer, prospection géochimique et prospection alluvionnaire constituent deux méthodes complémentaires d'études d'auréoles de dispersions superficielles. L'une identifie des minéraux, l'autre des éléments.

Mais rien n'empêche d'analyser des éléments sur des phases minéralogiques séparées, ou du moins largement enrichies. Une action concertée

récente de la DGRST sur ce sujet a montré avec une particulière évidence combien certains supports minéralogiques tels que hydroxydes de fer, matière organique, ou encore résidus détritiques rocheux, concentrent de manière sélective les éléments traces dont l'analyse en tout venant risque alors de représenter plus la quantification des différentes phases porteuses que l'élément recherché lui-même. Les recherches sur ce thème ne font que débiter. Elles débouchent sur une meilleure sélection des supports minéralogiques analysés en exploration, et vers une augmentation des performances de la méthode, et devraient donc connaître un puissant développement.

Il convient enfin de citer les tentatives, surtout canadiennes, de rendre la géochimie aéroportable : au lieu de s'adresser à des échantillons de la lithosphère superficielle, ne peut-on pas tracer les anomalies par l'intermédiaire de l'atmosphère ? De nombreux essais ont été conduits, notamment par le procédé Air Trace : détection de gaz émis par le gisement ( $\text{SH}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{I}_2$ , etc...), détection de poussières ou d'aérosols soulevés par le vent en pays arides. L'intérêt de ce projet n'a d'égal que sa difficulté : doter la géochimie, méthode essentiellement directe, des performances en coût de mise en œuvre et en rapidité d'exécution des autres techniques aéroportées (aéromagnétisme, électromagnétisme, radiométrie) reviendrait à ouvrir tout un champ d'investigation nouveau à la géochimie.

Cette voie a paru séduisante à l'époque de la conquête spatiale aux progrès de laquelle elle se trouvait intimement liée, et l'on a pu croire à son débouché vers 1970. Aucun cas réel de découverte n'est venu depuis concrétiser ces espoirs qui ne

sont plus soutenus par un effort de recherches aussi important à l'heure actuelle.

## CONCLUSION

Au seuil des années 1980, les méthodes géochimiques d'exploration minière apparaissent à la fois comme solidement établies dans leurs bases essentielles, parvenues au stade de l'utilisation routinière, un peu monotone même pourraient s'inquiéter certains.

En fait de nouvelles conquêtes l'attendent, tandis que la mise en œuvre systématique devrait déboucher sur une connaissance beaucoup plus approfondie, susceptible de modélisation prévisionnelle et/ou de convergence avec la géologie dont les travaux les plus avancés de cartographie régionale effectués en U.R.S.S. donnent un avant goût : après avoir couvert à l'échelle du 1/200 000 une surface significative de formations géologiques, ses auteurs en extrapolent les résultats au

nombre d'anomalies, d'indices, de gisements qu'ils rencontreront au cours des prospections des années ultérieures.

Même sans aller si loin, la méthode géochimique d'exploration tient une place incontestée dans l'architecture des méthodes d'exploration.

## BIBLIOGRAPHIE

- BOTBOL J.M., GOTT G.B., 1973. — Zoning of major and minor elements in the Coeur d'Alene mining district, IDAHO, U.S.A., in *Geochemical Exploration 1972*, I.M.M., London.
- BRGM, SNEA(P), 1977. — Rapport d'action concertée DGRST « Optimisation des méthodes de prospection géochimique régionale » Inédit.
- GRANIER C., 1973. — Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères, MASSON Ed., 143 p. Paris.
- LEVINSON A.A., 1974. — Introduction to Exploration Geochemistry Applied Publishing Ltd, Calgary.



# Les implications économiques de la lutte contre la pollution

par M. POTIER

chef de division à la direction de l'Environnement de l'OCDE \*

La pollution suscite souvent des débats où la passion l'emporte sur les données objectives.

Il est donc utile d'apporter des éléments chiffrés sur les programmes adoptés dans les grands pays industriels et d'essayer d'analyser leurs conséquences économiques, en dépit de la difficulté que cela représente.

Il en résulte que l'incidence de ces programmes sur le taux de croissance, sur l'emploi, sur l'inflation et sur les échanges internationaux est peu importante.

En outre, le coût de la lutte contre la pollution reste faible, notamment par rapport aux dépenses d'enseignement, de santé, de prévoyance sociale et de défense.

Il ne devrait donc pas y avoir de conflit entre la préservation de l'environnement et les objectifs de croissance et d'emploi. Mais ces dernières préoccupations conduiront à une plus grande efficacité dans l'utilisation des sommes consacrées à la lutte contre la pollution et à mieux mesurer les avantages apportés.

## LES IMPLICATIONS ECONOMIQUES DE LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION

La mise en place des politiques de l'environnement remonte à la fin des années soixante, époque pendant laquelle les gouvernements de la plupart des pays industrialisés ont ressenti qu'il était urgent de prendre des mesures visant à faci-

liter l'emploi rationnel des ressources naturelles, à éviter et à réparer les détériorations graves de l'environnement et à réduire les gênes résultant de la concentration des hommes dans des espaces limités.

Le contexte économique était, à cette époque, favorable à l'adoption de telles mesures puisque la croissance économique se déroulait dans les pays de l'OCDE à un taux moyen de l'ordre de 5,5 % pour la période couvrant les années 1959-1960 à 1975-1976. Ce contexte économique s'est notablement modifié en 1979. Le taux de croissance moyen des pays de l'OCDE est de l'ordre

\* Les opinions exprimées dans cet article sont propres à l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE.

Ces chiffres sont sans doute notablement sous-estimés du fait qu'ils ne couvrent qu'une partie des mesures de protection de l'environnement et qu'ils se réfèrent à des objectifs peu ambitieux. En sens inverse, on peut penser que ces coûts tendent à diminuer avec le temps une fois terminée la phase de rattrapage au cours de laquelle les installations existantes les plus anciennes seront équipées de dispositifs anti-pollution en bout de chaîne et quand le souci de l'environnement se trouvera intégré dans les processus de production des installations nouvelles.

Ces chiffres suggèrent aussi que, d'une manière générale, les dépenses dans le domaine de la lutte contre la pollution sont nettement inférieures à celles consenties dans d'autres domaines d'ordre social ou dans le domaine militaire (voir tableau 1).

TABEAU 1

Poids de certaines dépenses publiques pour quelques pays de l'OCDE correspondant à l'année 1974

(en % du produit intérieur brut en prix courants)

|                          | Educa-tion | Santé | Défense |
|--------------------------|------------|-------|---------|
| Australie .....          | 3,8        | 5,0   | 2,4     |
| Canada .....             | 6,5        | 5,1   | 1,2     |
| France .....             | 3,2        | 5,3   | 3,8     |
| Allemagne fédérale ..... | 3,0        | 5,2   | 3,1     |
| Italie .....             | 4,0        | 5,2   | 2,2     |
| Japon .....              | 2,6        | 3,5   | (0,9)   |
| Pays-Bas .....           | 5,9        | 5,1   | 3,0     |
| Suède .....              | 5,9        | 6,7   | 3,4     |
| Norvège .....            | 4,9        | 5,3   | 3,1     |
| Royaume-Uni .....        | 4,4        | 4,6   | 5,0     |
| Etats-Unis .....         | 5,3        | 3,0   | 5,8     |

Source : Tendances des dépenses publiques, OCDE, juin 1978.

Si le coût des programmes de lutte contre la pollution peut paraître modeste au niveau macro-économique, il est possible que les effets de la lutte contre la pollution soient plus importants au niveau sectoriel pour certaines branches industrielles.

— Au niveau micro-économique

Le pourcentage des dépenses de lutte contre la pollution de l'industrie privée par rapport au produit intérieur brut et à l'investissement privé

(1) Sur la base d'un amortissement du capital sur une période de dix ans.

de 3 % ; le chômage atteint plus de 5 % de la population active totale contre 2,8 % pour la moyenne des années 1962-1973 ; Le taux moyen d'inflation est de l'ordre de 8 % et atteint des niveaux bien plus élevés dans certains pays de l'OCDE.

C'est la raison pour laquelle il est légitime de se poser la question de savoir si le déroulement des politiques d'environnement est encore aujourd'hui compatible avec un ralentissement de la croissance économique. A cette fin nous proposons de répondre dans le cadre de cet article à toute une série de questions : combien de ressources doivent-elles être affectées à la lutte contre la pollution ? Quelles sont les conséquences du déroulement des programmes de lutte contre la pollution sur les taux de croissance du PNB ? Quel est l'impact de ces programmes sur le niveau de l'emploi et des prix ? Quelle influence exercent-ils sur la balance des paiements ? Quels sont enfin les bénéfices à attendre de tels programmes ?

Nous essaierons d'abord d'évaluer le fardeau économique que représente la lutte contre la pollution en examinant les montants et le niveau des dépenses qui sont consenties pour la lutte contre la pollution dans les pays de l'OCDE. Nous examinerons ensuite les conséquences économiques de ces programmes de lutte contre la pollution sur différents plans (taux de croissance, emploi, inflation, balance de paiements, bénéfices).

1. Le coût des programmes de lutte contre la pollution

On peut se faire une idée de l'importance des coûts en se plaçant successivement au niveau macro-économique et au niveau sectoriel.

— Au niveau macro-économique

Un bon indicateur du coût économique de la lutte contre la pollution pour une année donnée consiste à mesurer ce coût en faisant la somme des dépenses courantes occasionnées par les programmes de lutte contre la pollution, de l'amortissement des équipements au cours de l'année et des intérêts versés sur le capital. On dispose d'estimations calculées sur cette base du coût des programmes de lutte contre la pollution des entreprises publiques et privées pour quelques pays membres de l'OCDE. En 1975 ce coût représentait environ 1,7 % et 1,5 % du produit intérieur brut au Japon et aux Etats-Unis respectivement, il

total a été estimé pour dix pays membres de l'OCDE. Ces dépenses sont difficiles à identifier à la fois pour des raisons conceptuelles et pratiques ; aussi convient-il d'utiliser ces estimations avec une très grande prudence. Le tableau II montre néanmoins que l'effort de l'industrie a été notablement plus important dans des pays comme les Etats-Unis ou le Japon.

Des données plus détaillées disponibles rassemblées dans les tableaux III et IV nous fournissent toute une série d'indications intéressantes :

— Premièrement, il apparaît clairement que ces investissements sont très inégalement répartis par branche d'industrie. Au Japon et aux Etats-Unis, près de 70 % des investissements anti-pollution sont consentis dans six secteurs de production, sidérurgie, industrie pétrolière, électricité, pâtes et papiers, métaux non ferreux et produits chimiques ;

— Deuxièmement, ces chiffres montrent que pour l'ensemble des branches industrielles les dépenses d'investissements de lutte contre la pollution au Japon ont été deux fois supérieures à celles consenties par l'ensemble des industries américaines en 1973 et presque trois fois supérieures pendant les années 1974 et 1975. On constate depuis lors, un ralentissement notable de ces dépenses au Japon à la fois en raison du ralentissement de l'activité économique et du fait de l'achèvement du programme visant à mettre en place des équipements de contrôle des émissions d'oxyde d'azote.

On notera aussi que pour favoriser ces investissements de nombreux pays ont institué des régimes d'amortissement accéléré, des prêts à faible taux d'intérêt, des déductions sur les bénéfices imposables et même des subventions directes. La part de ces programmes d'aide dans le total des investissements anti-pollution n'est tou-

tefois pas très importante. Selon les informations obtenues à travers la procédure de notification des systèmes d'aide financière pour la prévention et la lutte contre la pollution mise en place dans le cadre de l'OCDE, cette part oscillait en 1975 entre 4,5 % et 14,2 % des investissements totaux. On peut donc dire que les pays membres de l'OCDE, appliquent dans une large mesure le principe pollueur-payeur.

Pour saisir l'impact réel des mesures de lutte contre la pollution sur les branches industrielles, il convient surtout d'estimer la part des coûts annualisés de la lutte contre la pollution par rapport aux coûts annuels de production afin d'apprécier l'incidence dans le long terme de ces mesures sur la branche industrielle concernée. Ces données sont particulièrement difficiles à estimer. Des efforts ont été entrepris dans le cadre de l'OCDE pour rassembler de telles données dans diverses branches industrielles (sidérurgie, aluminium, engrais, textiles, traitement de surface des métaux, pétrochimie, raffinage du cuivre) en procédant à une désagrégation très poussée des procédés de fabrication en utilisant à la fois les données estimées dans des études d'ingénierie et des données réelles collectées auprès d'usines. L'étude sur l'industrie sidérurgique a montré que pour la Suède, pendant la période 1970-73, les coûts annuels encourus par les usines existantes pour satisfaire à des normes d'émission données étaient de l'ordre de 1,3 % du coût total de production en 1973 (y compris les taxes). Les subventions gouvernementales relatives aux dépenses en capital pour la lutte contre la pollution ont réduit ces coûts à approximativement 1,0 % du coût total de production en 1973 ; au cours de la même période, 8,5 % environ du total des dépenses en capital de l'industrie sidérurgique ont été affectés à la lutte contre la pollution. En ce qui concerne les Etats-Unis, il a été estimé que le respect des

TABLEAU II

Investissements du secteur privé dans la lutte anti-pollution dans certains pays en 1975

|  | Etats-Unis | Japon | Allemagne | Danemark | Finlande | France | Norvège | Pays-Bas | Royaume-Uni | Suède |
|--|------------|-------|-----------|----------|----------|--------|---------|----------|-------------|-------|
| En % du PNB ...  | 0,44       | 1,00  | 0,32      | 0,17     | 0,22     | 0,28   | 0,22    | 0,34     | 0,29        | 0,19  |
| En % de la formation brute de capital fixe du secteur privé .... | 3,4        | 4,6   | 1,9       | 0,9      | 0,9      | 1,37   | 0,7     | 1,9      | 1,69        | 1,1   |

Source : Rapport sur l'Etat de l'Environnement, Paris, OCDE 1979, p. 129.

**TABEAU III**  
Dépenses en capital pour la lutte contre la pollution dans l'industrie des Etats-Unis

|   | En % des dépenses totales en capital |      |      |      |                     |
|---|--------------------------------------|------|------|------|---------------------|
|   | 1974                                 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978<br>Estimations |
| <b>TOUTES INDUSTRIES</b>                      | 5,0                                  | 5,8  | 5,6  | 5,1  | 4,7                 |
| <b>Industries de transformations</b>          | 8,0                                  | 9,3  | 8,3  | 7,0  | 6,2                 |
| Biens durables                                | 7,3                                  | 8,1  | 6,6  | 5,9  | 5,5                 |
| Métaux primaires                              | 16,6                                 | 17,2 | 15,7 | 15,7 | 14,4                |
| Hauts-fourneaux, aciéries                     | 12,1                                 | 13,5 | 15,1 | 16,7 | 19,5                |
| Métaux non ferreux                            | 21,8                                 | 24,1 | 18,9 | 17,1 | 11,6                |
| Outillage électrique                          | 6,8                                  | 5,8  | 5,6  | 3,4  | 3,4                 |
| Outillage (sauf électrique)                   | 1,8                                  | 1,8  | 1,6  | 1,8  | 1,8                 |
| Equipement de transports                      | 3,7                                  | 3,4  | 3,4  | 3,1  | 4,0                 |
| Automobiles                                   | 4,1                                  | 3,9  | 3,6  | 3,5  | 4,7                 |
| Avions  | 2,9                                  | 2,8  | 3,3  | 2,1  | 2,1                 |
| Pierres, argile, verre                        | 12,9                                 | 14,3 | 6,1  | 7,3  | 7,3                 |
| Autres biens durables                         | 4,5                                  | 5,3  | 3,9  | 3,6  | 2,9                 |
| Biens non durables                            | 8,7                                  | 10,3 | 9,6  | 8,0  | 6,8                 |
| Alimentation (y compris boissons)             | 4,7                                  | 5,2  | 4,5  | 4,2  | 4,7                 |
| Textile                                       | 3,3                                  | 4,6  | 4,4  | 3,8  | 3,5                 |
| Papier  | 19,3                                 | 16,8 | 14,7 | 13,8 | 9,6                 |
| Chimie  | 8,3                                  | 10,9 | 11,4 | 10,2 | 9,2                 |
| Pétrole                                       | 10,1                                 | 11,8 | 10,9 | 8,2  | 7,0                 |
| Caoutchouc                                    | 3,2                                  | 4,0  | 3,4  | 3,3  | 3,0                 |
| Autres biens non durables                     | 1,8                                  | 2,8  | 1,4  | 1,2  | 1,0                 |
| <b>Industries de non transformation</b>       | 3,0                                  | 3,2  | 3,5  | 3,5  | 3,6                 |
| Mines   | 1,8                                  | 1,9  | 2,2  | 2,2  | 3,1                 |
| Chemins de fer                                | 1,2                                  | 1,4  | 1,1  | 1,0  | 1,4                 |
| Transports aériens                            | 0,0                                  | 0,6  | 1,2  | 0,8  | 0,9                 |
| Autres moyens de transport                    | 2,3                                  | 1,4  | 1,1  | 1,0  | 0,9                 |
| Services publics                              | 7,9                                  | 8,4  | 9,1  | 8,8  | 8,7                 |
| Electricité                                   | 8,9                                  | 9,7  | 10,5 | 10,4 | 10,4                |
| Gaz et autres                                 | 1,5                                  | 1,5  | 1,2  | 0,7  | 0,8                 |
| Communication, services commerciaux et autres | 0,6                                  | 0,6  | 0,5  | 0,5  | 0,5                 |

Source : CEQ, 9<sup>e</sup> rapport annuel, 1978, p. 422.

normes d'émissions proposées pour 1983 se traduirait par des dépenses en capital de lutte contre la pollution se situant autour de 14 % à 17 % des dépenses totales en capital de l'industrie, tandis que le coût annuel était estimé à 4,5 % des coûts totaux de production en 1973.

Dans l'ensemble, les résultats de ces études indiquent que les coûts de la lutte contre la pollution constituent une fraction modeste de l'ensemble des coûts totaux de production par rapport à d'autres postes plus importants dans les

coûts de production comme l'énergie, les salaires, les transports, les matières premières, etc.

Il convient toutefois de nuancer ce jugement par deux remarques :

— d'une part, le montant des coûts n'a de signification que par rapport à un niveau donné de dépollution. Si les coûts de lutte contre la pollution qui découlent du respect des normes d'émissions ou des normes ambiantes de qualité présentes apparaissent tolérables, il n'en serait peut-être pas de même si les gouverne-



TABLEAU IV  
Dépenses en capital pour la lutte contre la pollution dans l'industrie japonaise (1)

|  | En % des dépenses totales en capital |             |             |             |            |                     |
|--|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------------|
|  | 1973                                 | 1974        | 1975        | 1976        | 1977       | 1978<br>Estimations |
| <b>TOUTES INDUSTRIES</b>                       | <b>10,6</b>                          | <b>15,6</b> | <b>17,7</b> | <b>13,5</b> | <b>7,2</b> | <b>5,5</b>          |
| Sidérurgie                                     | 17,3                                 | 18,6        | 18,4        | 21,1        | 11,5       | 11,2                |
| Industrie pétrolière                           | 18,5                                 | 32,6        | 41,7        | 31,4        | 5,9        | 4,4                 |
| Centrales thermiques électriques               | 26,4                                 | 44,7        | 47,1        | 44,0        | 35,1       | 24,7                |
| Pâtes et papiers                               | 22,1                                 | 22,8        | 22,7        | 17,6        | 9,1        | 7,8                 |
| Métaux non ferreux                             | 8,4                                  | 12,1        | 15,7        | 15,0        | 18,2       | 10,9                |
| Chimie (sauf pétrochimie)                      | 17,1                                 | 29,1        | 32,8        | 17,6        | 8,7        | 6,6                 |
| Outillage                                      | 4,0                                  | 5,5         | 5,2         | 3,5         | 2,5        | 2,7                 |
| Pétrochimie                                    | 15,7                                 | 18,9        | 18,4        | 13,8        | 9,9        | 7,1                 |
| Industries minières (sauf charbon)             | 24,4                                 | 32,9        | 37,9        | 37,6        | 26,2       | 19,9                |
| Textiles                                       | 10,1                                 | 13,7        | 20,4        | 7,4         | 4,0        | 2,5                 |
| Ciment   | 11,2                                 | 17,4        | 15,0        | 12,2        | 11,4       | 12,4                |
| Céramique (sauf ciment)                        | 9,9                                  | 10,2        | 10,2        | 8,2         | 5,8        | 7,7                 |
| Gaz  | 2,3                                  | 4,0         | 2,1         | 1,5         | 1,1        | 1,3                 |
| Charbon  | 4,0                                  | 2,5         | 8,2         | 2,7         | 2,1        | 2,1                 |
| Divers   | 8,6                                  | 9,4         | 9,1         | 4,9         | 3,7        | 2,7                 |
| Équipement de construction                     | 5,9                                  | 4,7         | 7,2         | 4,4         | 6,1        | 3,2                 |
| Énergie électrique (sauf centrales thermiques) | 1,1                                  | 1,0         | 1,1         | 0,9         | 0,8        | 0,7                 |

(1) Estimations basées sur des études d'engineering.

Source : Ministère japonais du Commerce international et de l'Industrie.

ments devaient adopter des objectifs beaucoup plus ambitieux de réduction des émissions même si la nécessité, créée par le souci de l'environnement, de repenser certains produits et procédés a parfois abouti à des innovations, des réductions de coûts et une augmentation des profits ;

- d'autre part, le niveau ou le montant des coûts est sérieusement affecté par le taux d'utilisation de la capacité de production. Pour les industries ne travaillant pas à 100 % de la capacité de production, le coût de la lutte contre la pollution est ressenti beaucoup plus fortement étant donné qu'une part importante des coûts de la lutte contre la pollution est fixe et ne varie pas avec le taux d'utilisation de la capacité de production.

## 2. L'impact des programmes de lutte contre la pollution sur le volume du PNB et la croissance économique

Il va sans dire que les ressources qui sont utilisées pour la lutte contre la pollution sont des ressources qui ne peuvent être affectées à d'autres fins. Le déplacement de ces ressources se

traduit-il par une baisse ou une augmentation du produit national brut conventionnellement mesuré ? Il n'est pas facile de répondre à cette question car elle dépend de la façon dont les ressources sont utilisées. Si les ressources productives sont destinées à une production strictement intermédiaire du point de vue de la comptabilité nationale, le PNB diminuera, mais si les ressources productives sont utilisées pour mettre en place des investissements anti-pollution, le PNB peut au contraire augmenter. La façon dont le PNB augmentera ou diminuera en réalité dépendra évidemment de la combinaison existant entre dépenses de produits intermédiaires et dépenses de capital.

Les seuls instruments dont nous disposons pour apprécier cet impact sont des modèles macro-économiques qui ont été mis au point dans quelques pays de l'OCDE. Ces modèles sont construits sur le même principe ; on considère d'abord les programmes de lutte contre la pollution comme des programmes exogènes aux activités économiques normalement pris en compte dans les modèles macro-économiques, puis on simule à travers ces modèles l'impact de ces programmes de lutte contre la pollution sur les grandes variables économiques (taux de croissance, inflation, emploi...)

Quels sont les enseignements des modèles économétriques réalisés au Japon, aux Etats-Unis, aux Pays-Bas ?

Le modèle japonais (2) montre que les investissements de lutte contre la pollution ont un effet expansionniste sur la demande réelle et stimuleront la production réelle et les dépenses en particulier au cours des trois premières années du programme qui se déroule de 1971 à 1977. Dans les deux scénarios envisagés (3) le taux de croissance réel du PNB réel s'élève de 1,2 à 2,6 points en % au début de la période intéressée, et de 0,1 à 0,2 points en % pour l'ensemble. Cette expansion est due essentiellement à des investissements privés induits par les dépenses anti-pollution — la consommation privée augmente également pendant les trois premières années et se stabilise ensuite.

Le modèle néerlandais (4) est le seul qui précise clairement les objectifs du programme de lutte contre la pollution en termes de réduction des émissions pour la période 1973-1985. Il indique que la réalisation de ce programme se traduira par une réduction de 5,1 % pour l'ensemble de la période étudiée. Cette réduction ne serait que de 3,5 % si l'on incluait les activités de l'industrie antipollution dans la définition de la production. Ce modèle montre également que la consommation fléchira de 6,4 % pour l'ensemble de la période.

Le modèle américain (5) qui couvre la période 1970-1983 montre que les programmes de lutte contre la pollution exercent un effet stimulant sur le taux de croissance jusqu'en 1976 à un taux supérieur de 1,6 % en 1975 par rapport à une croissance sans programme de lutte contre la pollution. Toutefois, pendant la deuxième moitié de la décennie le taux de croissance réel du PNB en 1983, incluant les programmes de lutte contre la pollution, est estimé être légèrement inférieur à ce qu'il aurait été de 2,2 % sans programme de lutte contre la pollution.

(2) Conséquences macro-économiques des politiques de l'environnement : l'expérience acquise par le Japon — Rapport du professeur S. Shishido, déc. 1974, OCDE, 35 p.

(3) Un objectif inférieur qui figure dans l'actuel plan quinquennal et un objectif supérieur considéré comme souhaitable par les autorités japonaises.

(4) The Economic Impact of Pollution Abatement by H. den Hartog, Central Planning Bureau, The Hague, occasional papers, 1975.

(5) The Macro-economic Impacts of Federal Pollution Control Programs by Chase Econometric Associates, CEQ, EPA, déc. 1976, mis à jour chaque année.

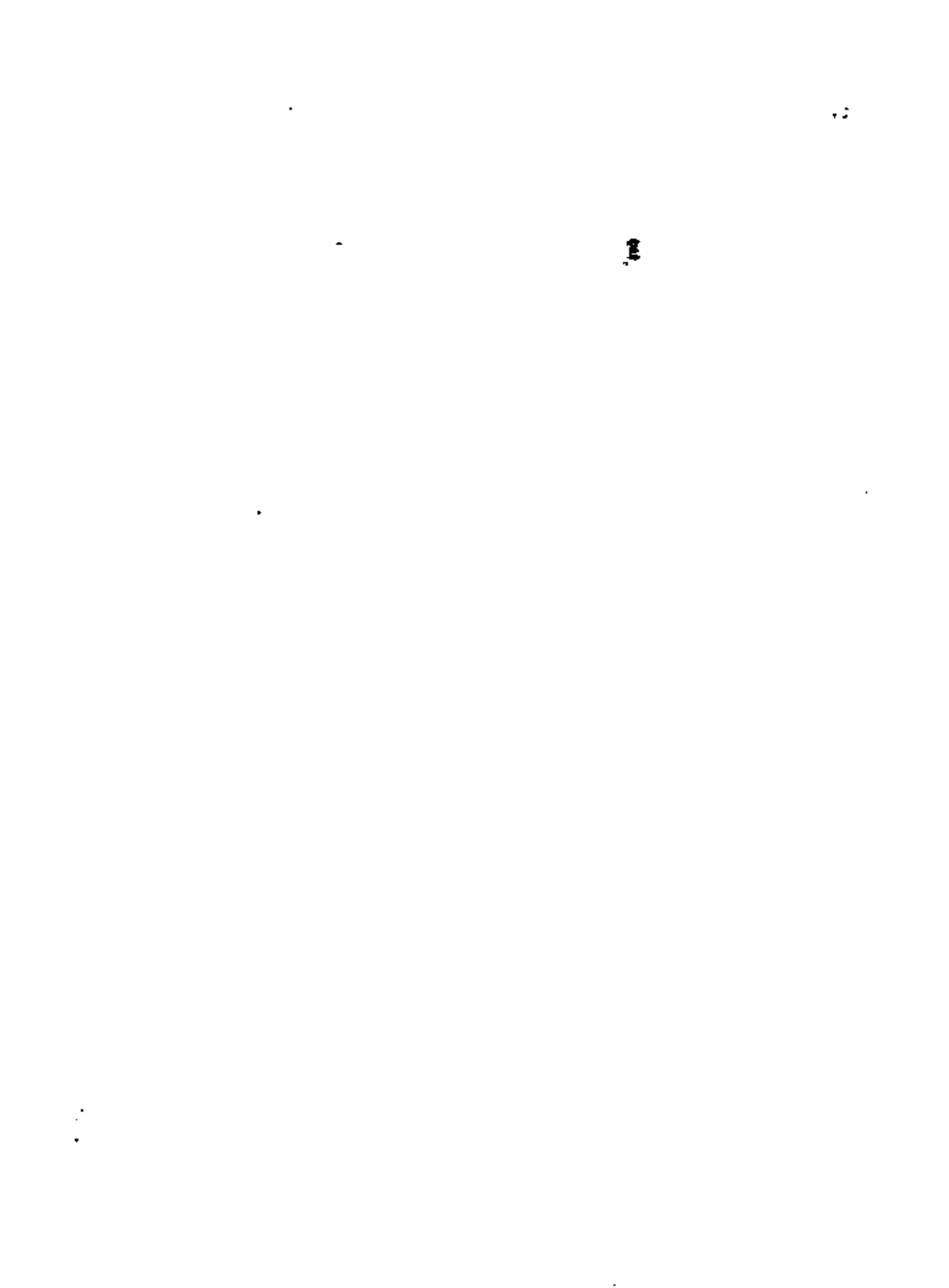
On voit qu'il est difficile de tirer des conclusions très précises quant à l'impact négatif ou positif des politiques de l'environnement sur la croissance économique puisque les modèles auxquels nous nous sommes référés aboutissent à des résultats divergents qui s'expliquent en grande partie par les différentes hypothèses de politique économique qui sous-tendent ces modèles. En revanche, il semble que l'on puisse soutenir raisonnablement, au vu de ces résultats, que l'impact des politiques de l'environnement sur la croissance économique globale, telle qu'elle est conventionnellement mesurée, n'est pas très important.

### 3. L'impact des programmes de lutte contre la pollution sur l'emploi (6)

L'influence des programmes de lutte contre la pollution sur l'emploi se manifeste essentiellement de deux façons : d'un côté ces programmes peuvent induire une réduction de la demande dans certains secteurs de l'activité économique du fait de l'augmentation du prix des biens et des services résultant de la mise en œuvre de ces programmes. Cette réduction de la demande peut affecter, en principe, de manière négative le niveau de l'emploi de la branche d'activité concernée. D'un autre côté, les programmes de lutte contre la pollution entraînent une augmentation de la demande dans d'autres secteurs de l'activité économique du fait des commandes de biens et d'équipement qui résultent de l'application des diverses dispositions législatives ou réglementaires adoptées dans différents pays pour réduire pollution et nuisances. La plupart des études réalisées dans les pays de l'OCDE montrent que les effets positifs l'emportent largement sur les effets négatifs.

Du côté négatif, c'est-à-dire du côté des pertes d'emploi imputables aux politiques de l'environnement, le seul pays pour lequel on dispose de données détaillées est les Etats-Unis, où a été créé au sein de l'Agence de la Protection de l'Environnement (EPA) un programme connu sous le nom de « Economic Dislocation Early Warning System ». Dans le cadre de cette procédure, les bureaux régionaux de l'Agence pour la Protection de l'Environnement rassemblent des informations qui font l'objet d'un rapport d'ensemble trois fois par an. Le plus récent publié en mai 1978 indique qu'il a été possible d'identifier 118 usines qui auraient

(6) Voir : M. Potier, Un nouvel instrument de politique économique encore sous-estimé, *Le Monde*, 2 mai 1978, p. 19.





fermé leurs portes à cause des mesures réglementaires de lutte contre la pollution pendant la période janvier 1971 - décembre 1977 provoquant le licenciement de 21 900 travailleurs (0,02 % de la population active). La plupart des suppressions d'emplois ont surtout touché les industries des métaux de première fusion et des produits chimiques.

Il est intéressant de comparer ce chiffre avec les estimations de création d'emplois disponibles dans plusieurs pays. Aux Etats-Unis, on a estimé à 1 million les emplois créés jusqu'en 1975 pour des dépenses totales de lutte contre la pollution correspondant à 15,7 milliards de dollars. On estime en outre que des dépenses additionnelles de l'ordre de 4,7 milliards de dollars donneront lieu à une création additionnelle de 193 000 emplois en 1980.

Ces chiffres rassemblent les emplois de bureau créés dans l'administration américaine, les emplois liés à la collecte et à l'élimination des ordures ménagères et tous ceux créés dans cette industrie nouvelle qu'est l'industrie de la lutte contre la pollution. En Allemagne fédérale, on évalue les emplois créés par les programmes de lutte contre la pollution à 278 000 pour la période 1970-1974 (soit 0,8 % de la population active) et à 366 000 les emplois devant être créés au cours de la période 1975-1979.

En France, une étude effectuée pour le compte du ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie chiffre le nombre d'emplois liés à la fabrication et à l'entretien d'équipements de lutte contre la pollution à 173 000 personnes en 1978, dont 44 500 emplois dans le domaine de la récupération.

Ces chiffres se trouvent dans l'ensemble confirmés par les résultats de plusieurs études de nature macro-économique entreprises aux Etats-Unis, au Japon, en Norvège et aux Pays-Bas. Elles montrent toutes que dans le court terme les programmes de lutte contre la pollution se traduisent par une création nette d'emplois. L'impact dans le long terme paraît plus incertain en ce sens que certaines de ces études font apparaître des conséquences légèrement positives (Japon, Norvège) et d'autres légèrement négatives (Etats-Unis, Pays-Bas), ce qui s'explique par le fait que les programmes anti-pollution font appel en général à des techniques utilisant relativement plus de capital que de main-d'œuvre.

L'expérience de certains pays montre que les programmes de lutte contre la pollution peuvent servir à stimuler l'activité économique, le Dane-

mark, la Suède utilisent de tels programmes pour la création d'emplois. En Suède, les programmes de lutte contre la pollution ont été développés de manière à créer quelque 20 630 emplois (soit 0,7 % de la population active) au cours de la période 1971-1974.

En Finlande, les programmes de lutte contre la pollution jouent un rôle important dans le programme actuel pour la relance économique et la création d'emplois.

#### 4. L'impact des programmes de lutte contre la pollution sur le niveau des prix

Il n'est pas déraisonnable de penser a priori que les dépenses de lutte contre la pollution puissent avoir un impact inflationniste du fait que le déplacement des ressources vers la lutte contre la pollution peut conduire à des hausses de prix, en particulier à cause de la hausse des coûts de production et à la suite d'une hausse des taux d'intérêt résultant de l'accroissement de la demande des moyens de financement pour les investissements anti-pollution. Un tel impact dépend également des réactions des consommateurs dans la mesure où les prix à la consommation se trouveraient affectés.

Les études effectuées aux Etats-Unis, au Japon, aux Pays-Bas et en Norvège pour estimer les effets directs et indirects sur les prix des mesures de lutte contre la pollution indiquent toutes que l'incidence des programmes de lutte contre la pollution est très faible, comparativement aux autres causes fondamentales des taux d'inflation élevés qui caractérisent les pays membres de l'OCDE aujourd'hui.

L'étude japonaise montre que la mise en place de programmes de lutte contre la pollution se traduit au début de la période par des pressions inflationnistes qui font place par la suite à un effet déflationniste ou à un excédent croissant des capacités de production et un ralentissement du rythme de croissance en volume de la production. La hausse des prix totale moyenne a été estimée pour la période quinquennale 1972-1977 à un ordre de grandeur compris entre 2,2 et 3,8 %, soit entre 0,4 et 0,7 % par an.

L'étude néerlandaise pour la période 1972-1983 fait état d'un chiffre extrêmement faible de 1 %.

L'étude américaine indique que l'indice des prix à la consommation serait à la fin de la période 1970-1977 plus élevé de 2,3 % qu'il ne l'aurait été en l'absence de programmes de lutte contre la

pollution, ce qui correspond à un accroissement des prix de 0,3 % par an en moyenne.

Dans le cas de la Norvège, on estime que si les accroissements de coûts de l'industrie étaient répercutés intégralement dans les prix à la consommation, l'indice de ces derniers augmentera de 0,4 % pour la période 1974-1977.

Comme on le voit dans l'ensemble la part de l'inflation imputable aux mesures de protection de l'environnement apparaît très marginale.

### 5. L'impact des programmes de lutte contre la pollution sur les échanges internationaux

Les programmes de lutte contre la pollution peuvent affecter les échanges internationaux de trois façons :

- en provoquant des changements dans le flux des échanges des produits du fait du renchérissement du coût des produits résultant du coût des mesures anti-pollution ;
- en incitant les industries à se relocaliser dans les régions où les normes d'environnement sont moins sévères ;
- en donnant lieu à l'établissement de barrières non tarifaires.

5.1. Les changements dans le flux des échanges de produits dépendent dans le court terme de trois facteurs :

- de l'ampleur selon laquelle la hausse des coûts de production va être transmise au niveau des prix et de l'élasticité des produits et des services en cause ;
- de la place que tiennent dans le pays concerné les produits incorporant beaucoup de pollution ;
- du comportement des pays concurrents en matière de lutte contre la pollution en fonction de leur dotation naturelle en ressources d'environnement et de leurs préférences sociales.

Les études économétriques qui ont été effectuées dans quelques pays pour estimer ces changements ne conduisent pas à des résultats probants ; elles indiquent une détérioration des échanges dans le cas du Japon et des Etats-Unis et un effet nul dans le cas des Pays-Bas. Il faut reconnaître que ces modèles du fait de leur conception macro-économique masquent les problè-

mes d'ajustement très sérieux auxquels peuvent être soumises les industries les plus polluantes.

En l'absence d'études empiriques dans ce domaine nous sommes cependant enclins à penser que l'impact des programmes de lutte contre la pollution sur le flux des échanges de produits n'est pas très important au moins pour deux raisons :

- d'une part, il nous semble que si un pays quelconque de l'OCDE avait souffert d'une détérioration sévère de sa position concurrentielle du fait des politiques de l'environnement, les industriels auraient certainement mené une campagne vigoureuse pour amener les autorités de ce pays à négocier une quelconque compensation à l'échelon bilatéral ou à l'échelon international. Une procédure de consultation a été créée au sein de l'OCDE au cas où un pays membre aurait à se plaindre de distorsions dans les échanges induites par les mesures de protection de l'environnement. Cette procédure n'a jamais été utilisée ;
- d'autre part, les discussions que nous avons pu avoir avec des industriels nous donnent à penser que les coûts de la lutte anti-pollution ne sont pas un élément déterminant de la capacité concurrentielle de l'industrie dans la mesure où les changements intervenus dans les autres coûts de production dans le court terme ont pu compenser les coûts de la lutte anti-pollution. De plus, il apparaît que ce qui va affecter la capacité concurrentielle d'une industrie n'est pas tant la charge additionnelle à supporter du fait de l'achat d'équipements anti-pollution que les retards apportés par certains gouvernements, parfois sous la pression de l'opinion publique, à autoriser la construction d'usines ou le retrait de l'autorisation une fois les travaux engagés.

5.2. On avait craint, il y a quelques années, que la mise en œuvre des politiques de l'environnement ne donne lieu à la création de paradis de pollution où se seraient réfugiées les industries les plus polluantes pour échapper aux mesures de contrôle de pollution. Il faut dire qu'à la lumière de l'expérience, il n'existe pratiquement guère d'exemples selon lesquels une branche d'industrie ou des usines d'une même branche se seraient déplacées dans l'espace pour des raisons d'environnement. Cela est aussi vrai à l'intérieur de la zone OCDE qu'à l'extérieur dans le sens des pays de l'OCDE vers les pays en voie de développement.

Toutes les études qui ont été effectuées jusqu'à présent conduisent à cette conclusion.

Ingo Walter (7) qui a procédé à une analyse détaillée des flux d'investissements caractéristiques des industries les plus polluantes localisées en Europe, aux Etats-Unis et au Japon conclut que les investissements effectués à l'étranger, que ce soit à l'intérieur de la zone OCDE ou en direction des pays du tiers monde, sont très peu influencés par des considérations liées aux mesures de lutte contre la pollution. Alors que les industriels américains se plaignent d'être astreints à des normes plus rigoureuses que leurs concurrents européens, cette étude loin de révéler une fuite des capitaux américains vers l'étranger met en évidence un accroissement important des investissements effectués par les industries européennes aux Etats-Unis, ce qui montre bien l'importance de facteurs autres que les mesures de lutte contre la pollution pour expliquer ce phénomène.

Les quelques données disponibles relatives à l'implantation d'installations industrielles suggèrent une certaine mobilité géographique qui serait imputable à des retards administratifs dans les autorisations de construire beaucoup plus qu'à des différences dans le niveau des normes entre régions et entre pays. Ainsi, par exemple, un certain nombre d'usines de produits chimiques ou de complexes pétrochimiques qui devaient être construits à l'origine en Allemagne fédérale ou aux Pays-Bas ont été finalement implantés en Belgique, en France ou en Espagne. On a fait également état d'un certain nombre d'entreprises japonaises à la recherche de sites dans les pays les moins développés du bassin du Pacifique. L'attention a aussi été attirée sur le fait que des minerais bruts extraits en Australie avaient été expédiés en Inde ou dans les Philippines (c'est le cas de minerais de cuivre à forte teneur en arsenic) pour y être débarrassés de leurs impuretés toxiques avant d'être exportés au Japon.

Tout récemment une étude réalisée par Barry Castleman et rendue publique en juin 1978 aux Etats-Unis a révélé que des tendances de relocalisations se dessinaient pour un certain nombre d'industries réputées dangereuses comme les industries de fabrication de fibres d'amiante, de production de mercure, de zinc, de pesticides ou de peintures à base de benzène. Le cas le plus net est celui de l'industrie de fibres textiles d'amiante où aucune nouvelle installation n'a été créée aux Etats-Unis à la suite des mesures de protection

rigoureuses des travailleurs récemment adoptées par le Congrès américain et où plusieurs usines ont depuis lors été installées au Mexique, au Brésil et à Taiwan. Il s'agit là d'un phénomène récent qu'il faut surveiller de très près en même temps qu'il faut veiller à l'apparition de barrières non tarifaires aux échanges qui résulteraient de la mise en place des récentes mesures adoptées par plusieurs pays membres de l'OCDE pour renforcer le contrôle des substances chimiques potentiellement dangereuses pour l'homme et l'environnement.

5.3. En effet, huit pays membres de l'OCDE ont récemment adopté des législations visant à renforcer le contrôle des substances chimiques qui sont introduites sur le marché. Ces dispositions concernent avant tout les substances chimiques nouvelles, et à cet égard certains pays comme les Etats-Unis ont introduit des procédures de notification qui s'appliquent aux fabricants nationaux comme aux importateurs. Vu la conjoncture économique, le risque est grand que ces dispositions soient détournées de leurs fins en vue de mettre en place des barrières protectionnistes. Il est donc de la plus haute importance que ces pays se mettent d'accord sur le type de tests à appliquer, sur les pratiques de laboratoire à suivre et sur la façon selon laquelle il faut traiter l'information confidentielle transmise par l'industrie si l'on veut prévenir ces difficultés. C'est dans cet esprit qu'a été créé au sein de l'OCDE au mois de septembre dernier un programme spécial de coopération internationale dans le domaine des produits chimiques dont l'objectif est d'aboutir à un certain degré d'harmonisation des politiques des pays membres concernés dans un délai de trois ans.

#### 6. Les bénéfices à attendre des programmes de lutte contre la pollution

Face à la perspective d'une croissance ralentie pour les prochaines années — qui se traduira nécessairement par des ressources disponibles moins importantes affectées à la lutte contre la pollution — il devient de plus en plus impératif d'être en mesure d'estimer l'ampleur des avantages ou des bénéfices que procurent la mise en œuvre de programmes de lutte contre la pollution.

Il s'agit là — on s'en doute — d'un domaine extrêmement compliqué pour lequel on est loin d'être à même de comparer les avantages marginaux d'un programme à ses coûts marginaux de mise en œuvre. Cela s'explique, bien entendu, par

(7) I. Walter, *Environmentally-induced Industrial Relocation to Developing Countries*, 1977, 49 p.

le fait que les avantages de la lutte contre la pollution sont particulièrement difficiles à mesurer en raison de l'absence d'un marché où se vendrait une eau pure ou un air pur. Il faut donc employer des techniques de mesure indirecte qui sont forcément approximatives et discutées. Toutefois, la plupart des études nationales disponibles indiquent que les avantages totaux des programmes de lutte contre la pollution dépassent largement les coûts totaux qu'ils entraînent. D'après des estimations récentes, alors que les dépenses consacrées à la lutte contre la pollution représentent dans les pays membres de l'OCDE comme nous l'avons vu entre 1 % à 2 % du Produit intérieur brut, les dommages causés par la pollution seraient compris entre 3 % et 5 % de ce même produit intérieur brut. Bien que les chiffres concernant le coût des dommages ne soient que des estimations approximatives et doivent être utilisés avec prudence, ils suggèrent néanmoins que la situation actuelle se traduit par une perte de bien-être.

Les avantages énumérés ci-dessus ne sont que les avantages directs associés à la mise en œuvre des programmes de lutte contre la pollution, mais il faudrait pouvoir aussi estimer l'ensemble des avantages indirects : économies sur les dépenses de santé, meilleure productivité du travail dans un environnement moins pollué et plus silencieux. Parmi ces avantages indirects il faudrait faire une place à part aux progrès technologiques qui ont pu être effectués sous la pression des mesures contre la pollution.

Même si ces avantages sont extrêmement difficiles à quantifier, ils demeurent néanmoins largement perçus par l'opinion publique ; c'est ce qui explique sans doute le soutien très fort accordé à la qualité de l'environnement lors de récentes enquêtes d'opinion publique effectuées aux Etats-Unis et au Canada.

..

## CONCLUSION

Au terme de cet inventaire de l'impact économique des programmes de lutte contre la pollution, nous voudrions conclure par trois remarques.

1. Les coûts des programmes de lutte contre la pollution dans les pays membres de l'OCDE apparaissent relativement modestes si on les compare aux dépenses consenties par les mêmes pays dans d'autres domaines comme ceux de l'enseignement de la santé publique ou de la défense. Ils apparaissent encore plus modestes si on les compare au coût des dommages correspondant à la mise en œuvre de ces programmes. Bien que les chiffres concernant les bénéfices de ces programmes ne soient que des estimations approximatives, ils suggèrent que du point de vue économique la situation actuelle implique une perte de bien-être et que les dépenses de lutte contre la pollution devraient être relevées.

2. Il découle des principaux points que nous avons examinés : impact des programmes de la lutte contre la pollution sur le taux de croissance, sur l'emploi, sur l'inflation, sur les échanges internationaux, que les conséquences économiques de la mise en œuvre de ces programmes ne semblent pas très importantes.

3. Il en résulte que les contraintes économiques qui prévaudront vraisemblablement jusqu'en 1985, pour réelles qu'elles soient, ne seront pas la source d'un conflit majeur entre les objectifs de politique économique et les politiques d'environnement. Cependant elles seront suffisamment fortes pour orienter les politiques d'environnement dans la recherche de la plus grande efficacité en vue d'assurer la meilleure utilisation possible des ressources des pays membres. Ces contraintes seront aussi suffisamment fortes pour que l'on s'efforce d'évaluer mieux que par le passé les avantages procurés par les améliorations de l'environnement dans des termes tels qu'ils permettent des comparaisons avec les avantages offerts par d'autres politiques.

# Téledétection et anomalies géochimiques à Échassières (Allier, France)

par M. J. LEFEVRE \*

*Mots clés :* Analyse d'image, Téledétection multispectrale, Pouvoir réflecteur, Flore, Photogéologie, Gravimétrie, Linéament, Prosp. géochimique détail, Sol, Prosp. biochimique, Li, W, As, Sn, F, Granite, Allier, Echassières.

## Résumé

La téledétection (1) appliquée à la géologie est, sous nos latitudes, souvent limitée par le masque pédo-végétal. Pourtant, en climat humide les relations roche - sol - végétation sont très étroites, et des travaux récents semblent montrer que dans certains cas, le couvert végétal peut être un révélateur d'informations géologiques.

Dans la région d'Echassières (Massif Central), qui présente un intérêt minier potentiel, le satellite Landsat a enregistré deux anomalies de la luminance (2) des végétaux, l'une située dans des prairies et cultures (blé, orge et colza), l'autre dans une région boisée (chênaie-hêtraie avec enrésinements). Ces anomalies semblent liées à un

stade phénologique (3) précis, début de l'activité chlorophyllienne, et disparaissent ensuite.

Les relations entre ce phénomène et la géologie structurale, la géochimie et la géophysique sont analysées.

Par ailleurs, des contrôles chimiques par analyse multi-éléments de prélèvements de sols et de végétaux, révèlent des corrélations remarquables entre l'anomalie spectrale de la végétation basse dans la région de Nades et les teneurs des éléments analysés, en particulier Li, W, As et Sn.

## Abstract

Remote sensing applied to geology is, at our latitudes, often limited by pedo-vegetal cover. Nevertheless, under humid climate, the relationship between rocks, soils and vegetation is very tight, and recent works seem to show that in some cases the vegetal cover may behave as a source of geological informations.

In the Echassières (French Massif Central) area, which

potentially is of mining interest, Landsat satellite recorded two anomalies of vegetation « luminance » located a former in prairies and cultivations (wheat, barley and colza) and a latter in a wooded area (oak and beech groves with pines). These anomalies seem to be related to a particular phenological period (beginning of the chlorophyllian activity) and disappear after that.

The possible relationships of the above anomalies with structural geology, geochemistry and geophysics are analyzed.

In addition soil and vegetables geochemistry by multi-element analysis, shows good correlations between the spectral anomaly of low-growing vegetation in the Nades district and the values for the analyzed elements, particularly for Li, W, As and Sn.

(3) Phénologie, étude des étapes saisonnières des végétaux (bourgeonnement, feuillaison, et défeuillage par exemple).

\* B.R.G.M.

(1) Notions de base de téledétection.

Le satellite Landsat est équipé d'un radiomètre à balayage multispectral qui balaye ligne par ligne la zone survolée.

Chaque scène comprend 4 images qui correspondent à l'observation d'une zone de 185 x 185 km dans 4 longueurs d'ondes.

Chaque image est formée de 2 340 lignes de balayages — des lignes de balayage sont elles-mêmes formées par la juxtaposition de points appelés pixels (= picture element). Un pixel (p) couvre une surface de 79 x 56 m, il est codé par 8 signaux binaires qui permettent de distinguer  $2^8 = 256$  tons de gris.

(2) Luminance. Énergie reçue par le capteur, sans tenir compte des corrections atmosphériques.

## Resumen

En nuestras latitudes, la teledetección aplicada a la geología queda limitada frecuentemente por los enmascaramientos edafológico-vegetales. Sin embargo, en clima húmedo, las relaciones roca-suelo-vegetación son sumamente estrechas y los trabajos llevados a cabo recientemente parecen demostrar que, en ciertos casos, la cubierta vegetal pueda constituir un verdadero revelador de informaciones de carácter geológico.

En la región de Echassières (Macizo Central de Francia), que representa un interés minero potencial, el satélite Landsat, ha permitido observar dos anomalías de la « luminance » de los vegetales, una de ellas situada en las praderas y zonas de cultivo (trigo, cebada y colza) y la otra

en una región de bosques (robles y hayas, con inclusiones de coníferas). Estas anomalías parecen encontrarse vinculadas con una etapa fenológica precisa, comienzo de la actividad clorofílica, y desaparecen acto seguido.

Las relaciones entre este fenómeno y la geología estructural, la geoquímica y la geofísica, son debidamente analizadas.

Por otro lado, los controles químicos por análisis multielementos de muestras de suelos y de vegetales, revelan correlaciones destacadas entre la anomalía espectral de la vegetación baja en el sector de Nades y los contenidos de los elementos analizados, y básicamente, Li, W, As y Sn.

## Introduction

Les travaux prometteurs de F. C. CANNEY (3) sur le rapport existant entre les anomalies géochimiques du sol et du sous-sol, et les anomalies de la réflectance (1) de résineux, ont incité en 1976 le B.R.G.M. et le G.D.T.A. dans le cadre de l'action recherche et développement à étudier par télé-détection aéroportée ce phénomène dans des forêts bretonnes sélectionnées pour leurs anomalies géochimiques. Malheureusement, au cours du printemps 1976, les mauvaises conditions atmosphériques régnant au-dessus de ces zones-test n'ont pas permis d'obtenir les documents nécessaires à cette étude.

C'est alors que nous avons cherché une solution de remplacement rendue possible par l'occasion qui nous était offerte d'exploiter les images Landsat disponibles au G.D.T.A. \*. Du fait de la fréquence de passage du satellite, ces documents sont disponibles en assez grand nombre et permettent d'avoir une vision répétitive des zones sélectionnées. Les zones-test bretonnes étant trop réduites en

dimension pour être compatibles avec l'échelle et la résolution des documents spatiaux, nous avons recherché un autre site d'expérimentation. La Division minière B.R.G.M. du Massif Central nous a alors proposé celui d'Echassières dans la forêt des Colettes (Allier). La division minière a mis à notre disposition des documents d'analyses géochimiques en roche concernant cette région où les anomalies en F, Li, W, Sn, Be, As, etc... à fort gradient, occupent une zone boisée suffisamment vaste pour être compatible avec l'échelle des documents spatiaux.

Les documents disponibles pour cette étude proviennent des « scènes » des 10 juin 1975, 6 mars 1976, 29 avril 1976 auxquelles est venue s'ajouter récemment celle du 20 septembre 1976.

Dans un deuxième temps, l'I.F.P. \* a réalisé des visualisations sur le restituteur d'images Vizir de chacun des quatre canaux de ces scènes à partir des bandes numériques, à l'échelle 1/125 000. Par la suite plusieurs traitements ont été réalisés : rapports de canaux divers, compositions colorées, classifications.

(1) Réflectance : (en %) — rapport de l'énergie réfléchie par l'énergie incidente solaire compte tenu des perturbations atmosphériques.

\* G.D.T.A. : Groupement pour le Développement de la Télé-détection Aérospatiale, 18, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse Cedex.

\* I.F.P. : Institut Français du Pétrole.

## Généralités

### I. — Présentation de la zone d'expérimentation

La zone-test d'Echassières se situe dans le département de l'Allier au croisement des axes routiers N 698 et N 687. La forêt des Colettes qui recouvre les 3/4 de la zone est en partie domaniale, en partie privée.

La morphologie du terrain est caractérisée par une colline « La Bosse » qui culmine à 771 m et d'où est issue une série de talwegs divergents.

### II. — Méthodologie

Elle comprend trois phases :

— réalisation à partir de photographies aériennes et de contrôles sur le terrain d'un plan d'occupation du sol de la zone-test, plan qui détermine plusieurs classes végétales,

— étude des images satellite produites après traitement du signal de chaque canal brut, en relevant toutes les « anomalies » de la luminance qui existent à l'intérieur des classes végétales,

— analyse multi-temporelle sur les documents Landsat de l'évolution du stade végétatif de ces classes, et mise en évidence des anomalies phénologiques qui peuvent avoir été détectées par les radiomètres.

### III. — Plan d'occupation du sol

Les photographies aériennes panchromatiques de l'I.G.N. \* de la mission juillet 1974 ont été notre outil de

base pour l'élaboration du plan d'occupation du sol (fig. 1). Malheureusement, dans cette région en proie aux défrichements et reboisements intensifs, l'exploitation des documents antérieurs d'une à deux années à l'enregistrement des images Landsat, s'est révélée insuffisante.

En juin 1978, une étude sur le terrain en compagnie d'un botaniste du C.N.R.S. \* (Service de la Carte de la Végétation) M. Ph. LE CARO, nous a permis d'actualiser ce document et de définir dans le détail les différentes classes végétales.

Enfin, depuis le mois d'août 1978, nous disposons de photos aériennes couleur à l'échelle 1/20 000.

D'une manière générale, la région qui nous intéresse est formée de trois grandes unités morphologiques :

— La zone forestière Sud-Ouest. Il s'agit d'une zone hétérogène, percée de carrières de kaolin très blanc toujours exploitées, et de carrières abandonnées et occupées par des étangs. La forêt elle-même, en grande partie privée, a été très modifiée par l'homme : la haute futaie de hêtres et de chênes a été très exploitée et parfois reboisée. Il en résulte un damier complexe de restes de hêtraie, de vieux taillis de même nature, d'enrésinements anciens et d'autres très récents, de jeunes taillis envahis par les genêts, de zones déboisées occupées provisoirement par des sols nus et enfin de prairies dans les clairières. C'est la zone minéralisée proprement dite.

— La zone forestière Nord-Est. Il s'agit d'une vaste zone homogène : grande futaie de hêtres et de chênes avec quelques résineux (Douglas, Epicéas, etc...). C'est la forêt domaniale des Colettes.

— La zone des prairies et cultures, située autour de la forêt, qui comprend outre de nombreuses prairies temporaires, quelques cultures de blé, colza et orges.

## Étude des images Landsat

Nous rappelons ici les longueurs d'ondes (en  $\mu\text{m}$ ) des quatre canaux Landsat :

— canal 4 : 0,5-0,6  $\mu\text{m}$  (vert + jaune) ;

— canal 5 : 0,6-0,7  $\mu\text{m}$  (orangé + une partie du rouge) ;

— canal 6 : 0,7-0,8  $\mu\text{m}$  (rouge + début du proche infrarouge) ;

— canal 7 : 0,8-1,1  $\mu\text{m}$  (proche infrarouge).

\* I.G.N. : Institut Géographique National.

\* C.N.R.S. : Centre National de la Recherche Scientifique.

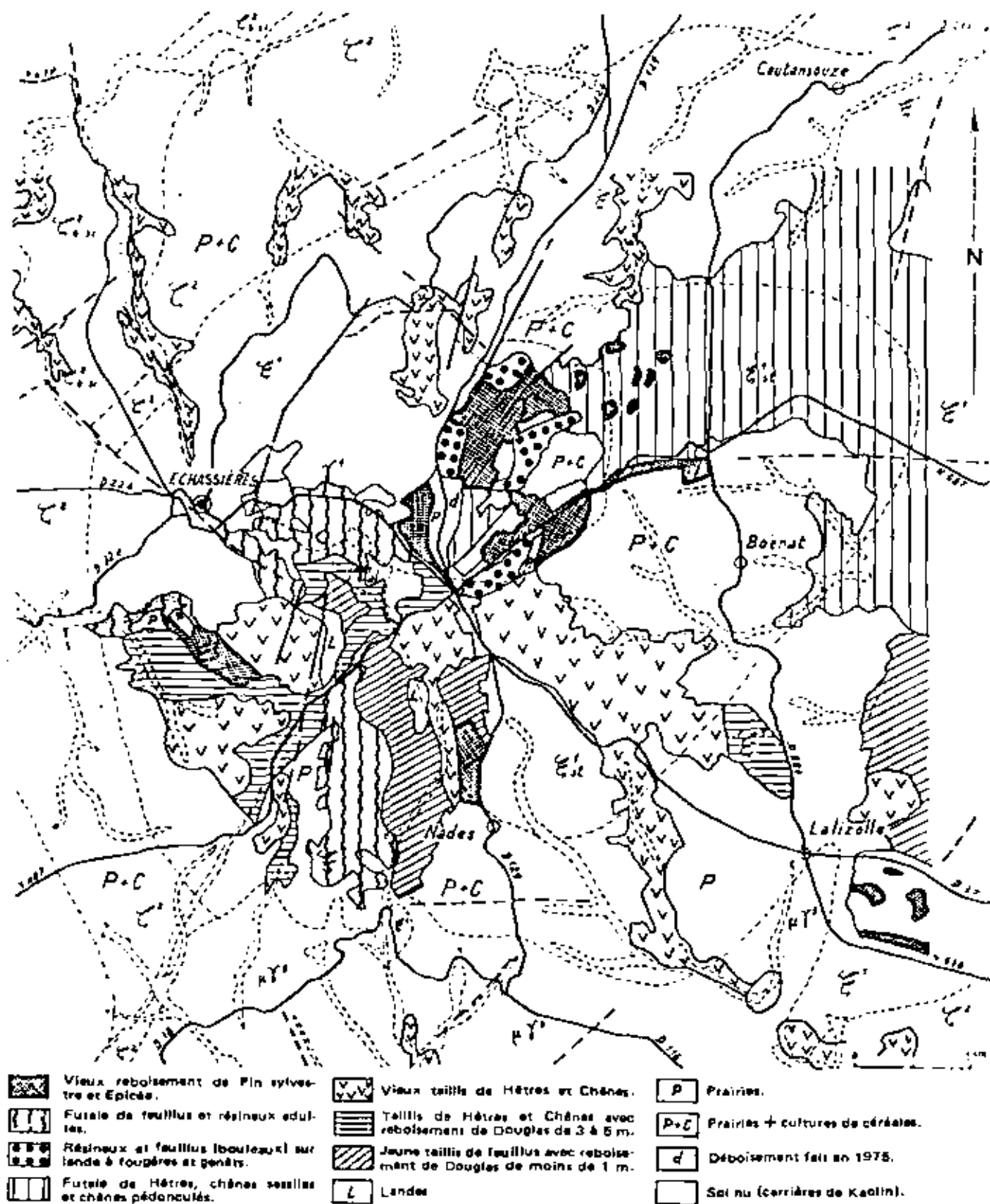


Fig. 1. — Plan d'occupation du sol de la région d'Echassières (d'après études sur le terrain et interprétation Photos I.G.N. 1974).



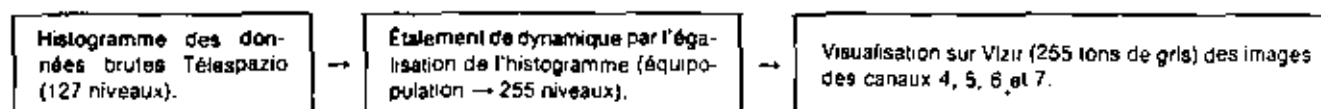
## I. — Traitements numériques des images

L'IFP — C. LALLEMAND et G. LEGENDRE (8, 13) — a procédé à différents traitements informatiques, non supervisés, des images enregistrées numériquement par la station de Télésazio en Italie. Ces traitements ont pour objectif :

— d'améliorer l'image brute (étalement de dynamique « stretching ») afin de la rendre plus lisible d'une part, et d'avoir le *maximum* d'information sur le site étudié,

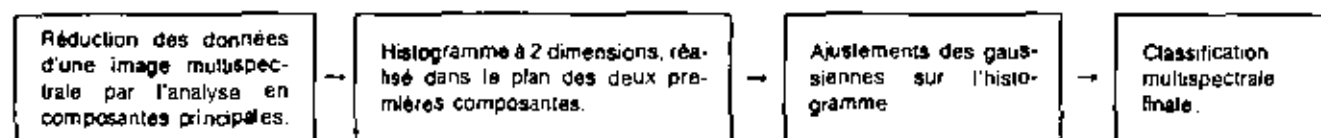
— de traiter cette nouvelle image (analyses en composantes principales, classifications, rapports de canaux, compositions colorées) avec des programmes qui permettent grâce à l'expérience acquise en la matière, de mettre en évidence certains phénomènes géologiques et botaniques, et donc de réduire le nombre de données à manipuler.

### • amélioration de l'image brute.



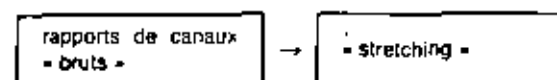
• compositions colorées : on attribue pour chaque canal d'une même scène une teinte, et l'on visualise l'image multispectrale colorée qui en résulte.

### • classification.

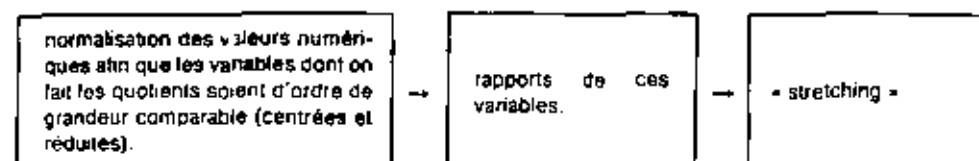


### • rapport de canaux, deux méthodes ont été utilisées :

a)



b)



## II. — Description des images

Les scènes étudiées après traitement numérique s'étaient sur deux années consécutives, 1975 et 1976. Elles seront décrites dans l'ordre des saisons en faisant abstraction de l'année, et donc en ne tenant pas compte dans ce travail des variations phénologiques qui peuvent survenir d'une année sur l'autre.

Dès le départ, on s'est aperçu qu'il était impossible de superposer les différentes visualisations entre elles ainsi qu'avec le fond topographique, en se basant sur le seul contour des forêts ou le tracé des rivières. L'un et l'autre en effet varient d'une scène à l'autre, en raison des différences d'éclaircissement et des variations phénologiques.

Par contre, en choisissant des points de repère qui ne varient pas en forme et qui contrastent suffisamment sur l'environnement, la superposition des images entre elles

ou avec la carte topographique devient possible. C'est pourquoi nous avons choisi quatre étangs suffisamment petits pour qu'ils ne soient représentés que par un « pixel », et situés au milieu de cultures et de prairies qui contrairement à l'eau réfléchissent les radiations quelle que soit la bande spectrale considérée et la saison choisie.

Dans l'étude qui suit nous avons pour chaque scène respecté le plan suivant :

1. — images des quatre canaux améliorés, dit « bruts » par opposition aux images multispectrales.

- étude de la forêt,
- étude des zones cultivées avoisinantes.

2. — images résultant des différents traitements (compositions colorées, classifications, rapports de canaux), leur apports par comparaison avec les images des canaux « bruts ».

#### Scène du 06 mars 1976

A cette époque la forêt n'a pas d'activité chlorophyllienne et elle absorbe les radiations à tous les niveaux spectraux concernés par les quatre canaux du radiomètre. Les différences de tons de gris qui apparaissent dans la forêt sont liées, sans qu'il soit possible de faire la part de l'un ou



Fig. 2. — Image Landsat — canal 7.  
Scène du 6 mars 1976. Echelle 1/125 000.

l'autre facteur, à l'occupation du sol, et à la morphologie du terrain (effets d'ombre liés à l'incidence solaire).

Dans les prairies et cultures qui entourent la forêt, l'activité chlorophyllienne a déjà débuté (forte luminance en  $\lambda 7$  - fig. 2), mais certaines parcelles réagissent encore comme un sol nu (céréales de printemps peu recouvrantes).

Les traitements d'image réalisés n'apportent rien par rapport aux canaux « bruts » dans la forêt proprement dite ; par contre dans la végétation basse, qui réfléchit fortement la lumière, apparaît l'ébauche d'une zone de forme sub-circulaire, de moindre luminance. Cette zone centrée sur les carrières de kaolin de Beauvoir, a un diamètre d'environ 5 km.

#### Scène du 29 avril 1976

La réponse de la forêt n'a guère varié par rapport à celle de mars. Cependant, le soleil étant plus haut sur l'horizon, l'influence de relief est moins nette, et les différences de tons de gris dans la forêt se rapprochant des réponses spécifiques liées au plan d'occupation du sol.

Les cultures basses présentent, elles aussi, une différence nette par rapport à la réponse du mois de mars. Les zones de sol nu sont en régression, car les cultures les plus tardives recouvrent totalement les parcelles. L'activité chlorophyllienne est très forte, ce qui fait apparaître sur les bandes spectrales 6 et 7 toute la région en tons de gris très clairs. La zone sub-circulaire qui apparaissait sur les compositions colorées du mois de mars devient nettement visible sur les images des canaux 6 et 7 (fig. 3) ; elle absorbe l'énergie et contraste ainsi fortement avec son environnement. Sachant que de mars à avril les cultures telles que le blé, le colza et l'orge, tendent vers une activité chlorophyllienne plus forte, le contraste prairies/cultures devrait au contraire s'estomper ; la zone d'anomalies ne peut dans ce cas être imputée à l'occupation du sol.

Les images résultant des différents traitements mettent bien en évidence cette anomalie.

#### Scène du 10 juin 1976

La forêt est entrée dans sa phase d'activité chlorophyllienne, chênes et hêtres sont couverts de jeunes feuilles. Sur les images des canaux 6 et 7 la radiation solaire est fortement réfléchiée, les limites de la forêt ne sont plus reconnaissables. Cependant, une zone centrée sur le granite de Beauvoir absorbe l'énergie solaire incidente (voir fig. 4).

Cette zone qui a une forme d'étoile à six branches présente des classes d'occupation du sol très diverses, parmi lesquelles futaies, taillis et prairies devraient en cette saison

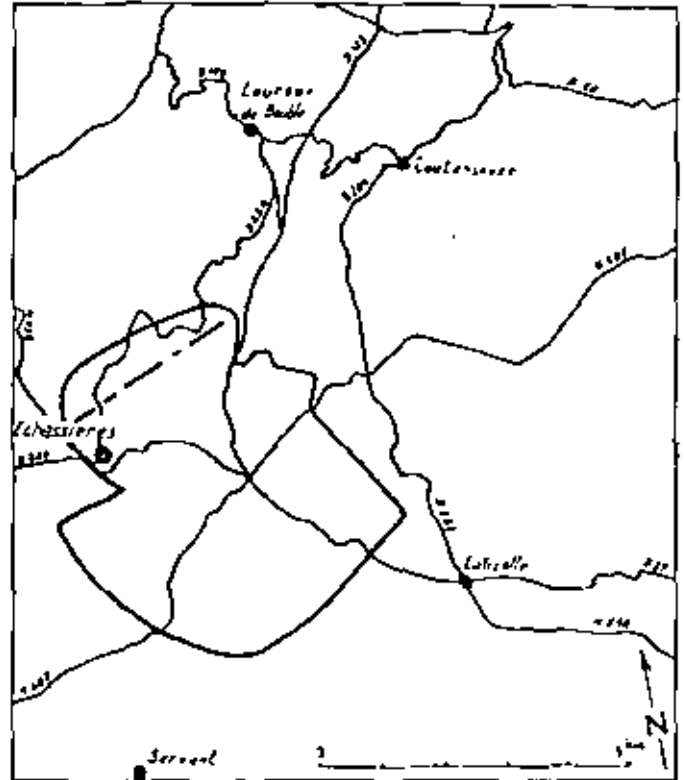
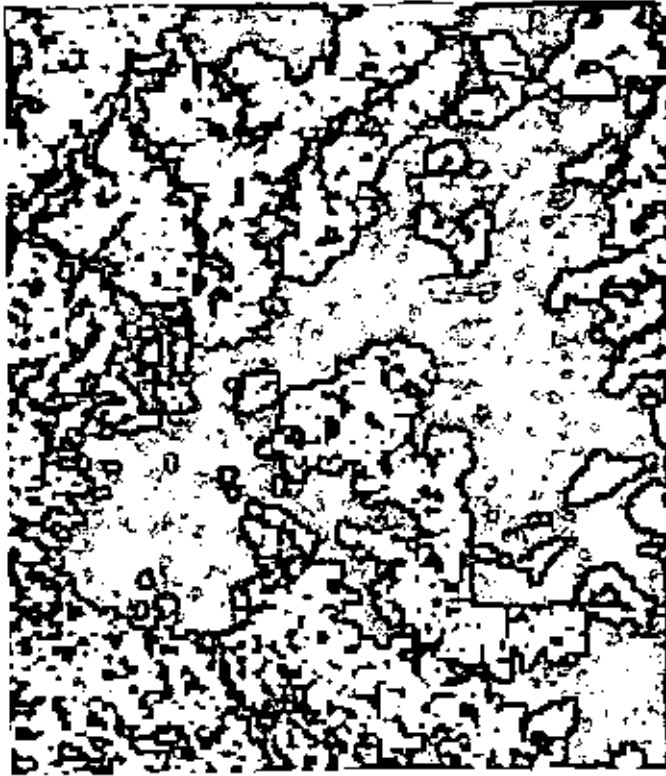


Fig. 3. — Image Landsat : Scène du 24 avril 1976 ; Canal 7. Échelle : 1/125 000

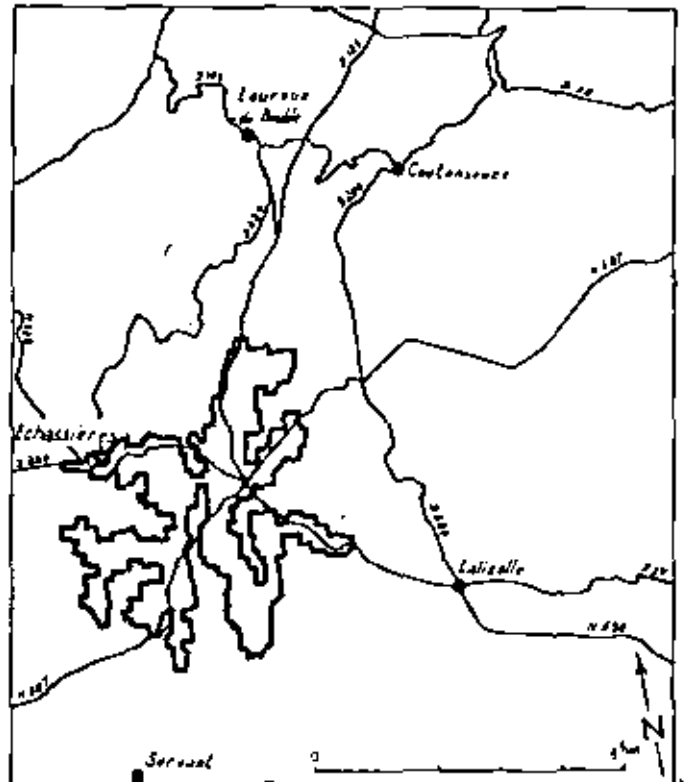


Fig. 4. — Image Landsat au 1/125 000 : Scène du 10 Juin 1975 ; Canal 7



Fig. 5. — Image Landsat : Scène du 10 juin 1975 — rapport de canaux à  $\frac{6+7}{4+5}$  échelle : 1/125 000.

et dans ce canal réfléchir fortement la radiation incidente ; ils représentent l'anomalie au sens strict, alors que résineux et déboisements qui absorbent classiquement la radiation dans cette partie du spectre sont inclus dans l'anomalie au sens large pour la raison exposée ci-dessous.

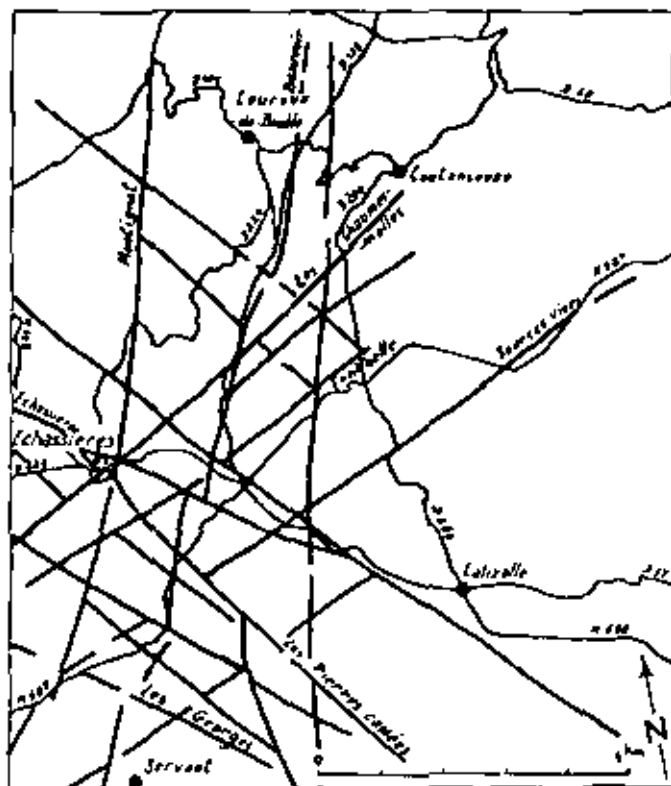
En effet les autres traitements d'images mettent en évidence l'anomalie, le rapport de canaux  $\frac{6+7}{4+5}$  montre

qu'elle s'ordonne dans son extension la plus grande (incluant donc résineux et déboisements) le long de linéaments de direction N 140-120° ; N 60-40° et N 20-100° (v. fig. 5). Ce phénomène est difficilement explicable dans l'état actuel de nos connaissances.

Dans les cultures et prairies qui entourent la forêt, l'anomalie sub-circulaire reconnue en avril 1975 s'est estompée, elle ne subsiste que faiblement autour du village de Nades.

#### Scène du 20 septembre 1976

La zone forestière se trouve au stade phénologique de maturation. Sur l'image du proche infrarouge ( $\lambda 6$  et  $\lambda 7$ ) la forêt — ton gris clair presque blanc — se confond avec l'environnement, à l'exception dans le Sud-Ouest des



zones de sols nus et de résineux gris foncés à noir sur l'image. La zone de forme étoilée a depuis le mois de juin, évolué de deux manières différentes :

- une partie de l'anomalie disparaît (par exemple entre la Bosse et Laitzelle) les classes végétales qui la composent ont repris un comportement normal,

- les résineux, le sol nu et une partie des végétaux chlorophylliens qui absorbent l'énergie dans ces longueurs d'ondes contrastent bien avec le reste de la forêt.

Dans le domaine de la végétation herbacée, l'anomalie sub-circulaire a disparu, à l'exception du secteur de Nades. Si en juin, les prairies et les cultures (blé, orge, colza) à l'exception du maïs (peu représenté sur la zone) ont à peu près la même réponse spectrale (forte réflectance), en septembre, ces deux types d'occupation du sol présentent des évolutions différentes. D'une part, les prairies fauchées à la fin du mois de juin sont en début de regain : elles ont donc une forte activité chlorophyllienne et réfléchissent l'énergie solaire incidente dans le proche infrarouge ; d'autre part, les cultures moissonnées au début du mois d'août, sont labourées en septembre, cette classe qui absorbe la radiation répond donc comme un sol nu.

Ainsi on peut conclure de manière quasi certaine à l'indépendance entre l'occupation du sol et l'anomalie sub-circulaire.

Dans le rapport de canaux  $\frac{6+7}{4+5}$ , les linéaments mis en évidence sur l'image du 10 juin 75 résultant du même rapport de canaux, sont toujours visibles.

En définitive l'étude des visualisations des différentes scènes montre que quelle que soit l'occupation du sol, il apparaît suivant les saisons deux anomalies de la luminance des végétaux :

A. — dans les prairies et cultures en début de stade végétatif : une anomalie sub-circulaire décelable grâce aux traitements d'images au mois de mars, nettement visible en avril, elle s'estompe en juin (à l'exception de la région de Nades) et disparaît en septembre.

B. — dans la zone forestière, également en début de stade feuillé : une anomalie de forme étoilée, visible en juin et qui disparaît en partie en septembre.

### III. — Étude de détail des anomalies multispectrales

Nous avons étudié plus précisément ces anomalies et pour ce faire nous avons procédé suivant trois étapes :

1. Report sur les photographies aériennes des contours de l'interprétation de l'anomalie étoilée à l'aide d'un Zoom transfertscope mis à notre disposition par Bosch et Lomb. Le Zoom transfertscope est un appareil d'utilisation rapide et précise, mais nous n'avons pu l'utiliser que pour le report d'une seule anomalie. Cet appareil nous a montré, qu'il n'y avait pratiquement pas de déformation entre les images Landsat et les photographies aériennes, et que leur superposition avec les cartes topographiques était possible.

2. Agrandissement à l'échelle du 1/30 000 de 3 images Landsat (29 avril 76, 10 juin 75,  $\frac{7+6}{4+5}$  10 juin 75) et d'un fond topographique transparent, en vue de leur superposition ; c'est la méthode que nous avons le plus utilisée sur le terrain.

3. Durant la dernière semaine du mois de juin 1978, nous avons procédé, avec la collaboration d'un botaniste, à une actualisation du plan d'occupation du sol. Les régions qui ont été étudiées sont celles qui correspondent à l'anomalie étoilée, en forêt, à la région de Nades où a été reconnue l'anomalie sub-circulaire.

Comme le laissait présager l'étude phénologique et chronoséquentielle préalable réalisée au moyen des images Landsat, notre travail sur le terrain a montré qu'en ce qui concerne les anomalies en région de cultures, il y a complète indépendance entre le type d'occupation du sol et la présence des anomalies de la luminance. Nous avons,

pour vérifier ce fait, visité pour identification, dans les régions de Nades et de Montmins, toutes les parcelles anormales, celles qui les entourent, et celles qui sont représentatives des cultures de toute la région d'Echassières. Toujours dans le même esprit, nous avons étudié plus particulièrement 2 champs de manière très détaillée. Ces deux parcelles occupées par de la prairie, sont situées l'une sur l'anomalie et l'autre à l'extérieur : l'orientation, la pente, la nature de la roche-mère sont identiques pour les deux. L'analyse botanique fine montre que les espèces de graminées qui y poussent sont strictement identiques (Tableau 1).

En ce qui concerne l'anomalie localisée en forêt, comme le montrait l'interprétation des photographies aériennes, la topographie et l'orientation de ces régions très diverses, n'expliquent pas l'existence d'une telle variation de la luminance. Nos observations ont montré que l'ancienne chênaie-hêtraie a été très exploitée depuis 20 ans, et que la forêt présente actuellement beaucoup de coupes et de reboisements en épicéas et douglas âgés, mais aussi des enrésinements récents dans les taillis ou les friches occupées par des genêts et des fougères. On trouve aussi dans les clairières, des prairies temporaires. Vue du terrain, cette occupation du sol est générale dans toute la partie SW de la forêt. Les limites de parcelles ne correspondent pas avec l'anomalie, à l'exception des limites de vieux reboisements en résineux, et dans la région de Fontbelle, d'une coupe récente très importante qui répond comme un sol nu.

Dans l'anomalie étoilée, nous avons également étudié comparativement des parcelles situées sur et hors anomalie, pour une analyse botanique fine ; pour plus de commodité nous avons choisi deux prairies de clairières ceci afin de comparer les résultats avec ceux de deux parcelles-témoins de Nades (anomalie sub-circulaire). Nous n'avons pas non plus trouvé de différence dans le nombre, la fréquence, et la catégorie des différentes espèces qui peuplent ces parcelles.

Au cours de notre mission sur le terrain réalisée avec la collaboration de M. SUPOMO, géologue-stagiaire de l'IFP, en dehors du travail proprement botanique nous avons fait quelques prélèvements de sol en vue d'une étude du pH et de l'humidité. Enfin, sur les 4 parcelles-témoins, nous avons installé pendant 2 jours des thermo-sondes, dans le sol et dans le sous-sol à 35-40 cm, et des thermo-hygro-mètres à 1,50 m. Ces mesures comparatives n'ont montré aucune différence significative, ni en ce qui concerne l'humidité du sol et de l'air, ni en ce qui concerne les températures.

Enfin, au cours de l'année 1979 nous avons procédé avec l'équipe de M. CARROUÉ (BRGM-Massif Central) à une campagne de prélèvements de sols et de végétaux dans la région de Nades de part et d'autre de l'anomalie sub-circulaire. Les résultats obtenus sont analysés dans le paragraphe IV de la dernière partie de ce texte.

Tableau 1. — Composition floristique des 4 prairies échantillon

|                            |                              | A | C | B | D                           |                               |                                | A                         | C | B | D |   |
|----------------------------|------------------------------|---|---|---|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---|---|---|---|
| 1                          | <i>Dactylis glomerata</i>    | + | 0 | + | +                           | 3-1                           | <i>Achillea millefolium</i>    | +                         | + | + | + |   |
|                            | <i>Festuca pratensis</i>     |   | a | + | 0                           |                               | <i>Anthoxanthum odoratum</i>   | 0                         |   | 0 | a |   |
|                            | <i>Lolium italicum</i>       | + | a |   |                             |                               | <i>Centaureum umbellatum</i>   |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Lolium perenne</i>        | + |   |   |                             |                               | <i>Hypericum perforatum</i>    |                           | + |   | + |   |
|                            | <i>Lotus corniculatus</i>    | + |   |   | a                           |                               | 3-2                            | <i>Bellis perennis</i>    | + |   |   |   |
|                            | <i>Trifolium pratense</i>    | + | a | + | +                           |                               |                                | <i>Brunella vulgaris</i>  | + | + | + | + |
| <i>Trifolium repens</i>    |                              | a | + | a | <i>Hypochoeris radicata</i> | +                             |                                |                           |   | + |   |   |
| 2                          | <i>Agrostis vulgaris</i>     | a | + | + | a                           | <i>Plantago major</i>         |                                | +                         |   | + |   |   |
|                            | <i>Centaurea gr. nigra</i>   |   |   |   | +                           | 3-3                           | <i>Ajuga reptans</i>           | a                         |   |   |   |   |
|                            | <i>Holcus lanatus</i>        | 0 |   | a | 0                           |                               | <i>Mentha arvensis</i>         |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Lathyrus pratensis</i>    |   |   | + |                             |                               | <i>Ranunculus repens</i>       | +                         | + |   | a |   |
|                            | <i>Medicago sativa</i>       |   | + |   |                             | <i>Veronica serpyllifolia</i> |                                | +                         |   |   |   |   |
|                            | <i>Phleum pratense</i>       |   |   |   | +                           | 4-0                           | <i>Bromus mollis</i>           | +                         |   | + |   |   |
|                            | <i>Poa pratensis</i>         | a | + | a | +                           |                               | <i>Cirsium arvense</i>         |                           | + | + |   |   |
|                            | <i>Rumex cf. crispus</i>     |   | + | + |                             |                               | <i>Geranium dissectum</i>      |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Taraxacum officinale</i>  | + | + | a |                             |                               | <i>Sonchus oleraceus</i>       |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Trifolium elegans</i>     |   | + | + |                             |                               | <i>Trifolium filif. dubrum</i> |                           |   | + |   |   |
|                            | <i>Vicia sativa</i>          |   | + | + | +                           | <i>Vicia tetrasperma</i>      |                                | +                         |   |   |   |   |
| 3-0                        | <i>Cerastium caespitosum</i> |   |   |   | +                           | 4-1                           | <i>Rumex Acetosella</i>        |                           |   |   | a |   |
|                            | <i>Convolvulus arvensis</i>  | + |   |   |                             |                               | 5                              | <i>Crataegus monogyna</i> |   |   |   | + |
|                            | <i>Daucus carota</i>         | + | + |   |                             | <i>Melandryum silvestre</i>   |                                |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Leucanthemum vulgare</i>  | + |   |   | +                           | <i>Quercus pedunculata</i>    |                                |                           |   |   | + |   |
|                            | <i>Plantago lanceolata</i>   | + | + | + | +                           | <i>Rubus sp.</i>              |                                |                           | + |   |   |   |
|                            | <i>Potentilla reptans</i>    |   | + |   |                             | <i>Sarothamnus scoparius</i>  |                                |                           | + |   |   |   |
| <i>Veronica chamaedrys</i> | +                            | + |   | + | <i>Ulex europaeus</i>       |                               |                                |                           |   | + |   |   |

0... espèce dominante ou très abondante

a... espèce assez abondante

+... espèce présente

A et C... hors anomalie

B et D... sur anomalie

- 1 Plantes prairiales semées
- 2 Plantes spontanées à biomasse aérienne importante
- 3 plantes gazonnantes ou stolonifères à biomasse aérienne faible
  - 3-0 Plantes prairiales mésophiles banales
  - 3-1 Plantes favorisées par la sécheresse du sol
  - 3-2 Plantes favorisées par le pâturage (voir aussi 3-3)
  - 3-3 Plantes favorisées par l'humidité et/ou le pâturage
- 4 Plantes de sol nu (annuelles, ou vivaces à organes aériens éphémères)
  - 4-0 Plantes banales des vides
  - 4-1 Plantes indicatrices de vieillissement de la prairie (voir aussi 4-0, 3-1 et 3-2)
- 5 Plantes pionnières de la lande ou de la lande boisée

La nomenclature est celle de : P. FOURNIER, Les quatre flores de la France, Lechevalier, 1946.

#### IV. — Conclusions partielles

Il apparaît donc que les anomalies de luminance révélées par l'imagerie Landsat, ne sont pas en relation avec la morphologie du terrain, l'orientation des pentes et l'occupation du sol.

Pourtant ces anomalies semblent liées à la végétation, et plus particulièrement à la période phénologique de début de stade végétatif, mars-avril pour les cultures et prairies, juin pour la forêt.

D'après la bibliographie, cette période est celle durant laquelle les végétaux sont le plus sensibles à des phéno-



mènes particuliers de leur environnement (sur ou sous-alimentation hydrique, toxicité minérale par exemple). Cependant, nous n'avons pas noté de chlorose flagrante qui classiquement révèle ce genre d'anomalies, et nos

mesures d'humidité ne montrent pas de valeurs anormales. Il semble donc que les phénomènes captés par le satellite soient trop fins pour être détectés avec les moyens d'investigation que nous possédions sur le terrain.

## Rapport entre les anomalies de luminance et la géologie (Géologie structurale, géophysique et géochimie)

### I. — Le cadre géologique

(communication orale J. P. CARROUE, 1, 5)

#### 1. Géologie régionale

La zone-test d'Echassières se situe à cheval sur deux ensembles géologiques : les schistes cristallins et les massifs granitiques quiaffleurent au milieu d'eux.

##### • Les schistes cristallins

Il s'agit de micaschistes de la série cristallophyllienne de la vallée de la Sioule, disposés en antiforme dont le cœur se localiserait à environ 1 km à l'Est du massif d'Echassières.

##### • Les massifs granitiques

Ils sont de deux types :

— le laccolithe de microgranite de Pouzol-Servant au Sud de notre domaine d'étude, interstratifié dans les schistes cristallins,

— le massif granitique d'Echassières, très minéralisé, qui englobe l'ensemble des formations éruptives du secteur, c'est-à-dire :

• le massif granitique des Colettes, qui est un granite porphyrique à deux micas ;

• la petite coupole de granite à albite-lépidolite de Beauvoir, qui flanque le précédent dans sa partie méridionale ;

• les filons de microgranite de la Gourdonne, de Chaillat, etc... qui s'alignent sur plusieurs kilomètres au sud des précédents, et celui de la Croix des Bois situé au Nord-Est.

#### 2. Histoire géologique du massif d'Echassières

Les principaux épisodes qui ont marqué l'histoire géologique du massif et qui ont contribué à la mise en place du

gisement, peuvent être schématisés de la façon suivante :

2.1. — L'étape pré-Colettes ou du « granite de la Bosse » est l'étape la moins connue, durant laquelle s'est formé le stockwerk de la Bosse avec :

- le dépôt principal du tungstène,
- le dépôt partiel du fluor,
- une partie de l'arsenic.

2.2. — L'étape majeure de la formation du massif, celle au cours de laquelle s'est mis en place le granite des Colettes et dans laquelle on distingue trois phases d'évolution géochimique :

- fixation du lithium, du fluor, de l'étain et probablement du béryllium et du tungstène,
- muscovitisation avec déplacement du lithium et du fluor et fixation de l'étain,
- naissance des dépôts filoniens de tungstène et d'arsenic de la zone Nord.

2.3. — L'étape de « l'albite » de Beauvoir, au cours de laquelle ont eu lieu les véritables concentrations en étain, lithium, fluor, phosphore et béryllium.

2.4. — Les étapes tardives à caractère hydrothermal, responsables de nombreux filons de quartz, quelques fois accompagnées d'un apport éventuel de plomb, de zinc, de cuivre et de fluor.

2.5. — Les phénomènes d'altération secondaire et plus particulièrement la kaolinisation.

#### 3. Historique des exploitations

Les minéralisations du massif granitique d'Echassières et de son auréole de dispersion dans les micaschistes sont connues depuis fort longtemps.

L'étain a été exploité à l'époque gallo-romaine au contact du granite de Beauvoir. Ensuite les grandes étapes de



l'exploitation du gisement se situent :

- entre les deux guerres pour le tungstène du Mazet,
- après la guerre pour le tungstène du stockwerk de la Bosse,
- depuis 1962 et jusqu'à nos jours où le B.R.G.M., puis Pennaroya et B.R.G.M. ont procédé à diverses études de reconnaissance (sondages, prospections alluvionnaires, géochimie roche, etc...).

Ce sont sur ces analyses géochimiques en roche (maille 800 m × 800 m) que nous avons travaillé. Elles ont été publiées avec les travaux de G. AUBERT (1) sur le massif d'Echassières, sous forme de cartes où sont portées les courbes d'iso-teneurs des différents éléments.

## II. — Rapport entre les anomalies multispectrales des végétaux et la géologie structurale

### 1. Anomalie sub-circulaire (fig. 6)

Comme il a été dit plus haut, cette anomalie a, en fait, la forme de deux cercles imbriqués l'un dans l'autre ; le massif granitique d'Echassières est tout entier inclus dans la partie Nord de l'anomalie.

Au Nord, l'anomalie suit strictement la limite du granite des Colettes entre le Mazet et Les Sapins, en respectant les deux décrochements des Montmins, elle débordé largement le granite au Sud-Est ; elle suit sur quelques centaines de mètres la faille de direction N 140° d'Echassières (v. carte Géol. 1/50 000, Gannat) et débordé légèrement le granite au NW entre Echassières et le Mazet.

Au Sud, il ne semble pas y avoir de rapport entre l'anomalie et la distribution des micaschistes, ni celle de l'auréole de métamorphisme.

### 2. Anomalie étoilée et linéaments associés (fig. 7)

L'anomalie de forme étoilée possède trois branches septentrionales (Echassières, Fontbelle — Les Chaumes-Molles, et la Bosse — Les Sapins) incluses dans le granite des Colettes. Le contour Sud des branches d'Echassières et La Bosse — Les Sapins suit la limite sud du granite. Les branches méridionales et septentrionales s'articulent au niveau du granite de Beauvoir.

L'anomalie multispectrale reconnue sur la visualisation

du rapport  $\frac{6+7}{4+5}$  de juin 1975 s'ordonne le long de linéaments qui, soit la composent, soit la tangent. Ces linéaments sont nombreux, mais les plus importants s'orientent selon 3 directions principales qui sont N 20°, N 110-140° et N 40-60°.

#### Le système N 20°

2.1. — Le linéament de Beauvoir. C'est le linéament le plus important de l'image. On peut le suivre sur plus de 20 km. Il est tangent aux branches nord-sud de l'anomalie multispectrale. Il est, sur la zone-test, décroché en plusieurs points par des linéaments de direction N 110-140°. Cela se produit :

- au Sud du granite de Beauvoir,
- au lieu-dit Les Bois du Rouet,
- au Sud du point coté 701 m,
- au lieu-dit les Georges.

Le linéament de Beauvoir emprunte par endroits des fractures parfaitement connues. En certains points le prolongement de ces accidents a été reconnu sur le terrain. Du nord au sud, les failles ou failles-filons connus qui contrôlent ce linéament sont :

- la faille-filon des Montmins,
- son prolongement vers le sud au niveau de la Croix-Lambin. Les contrôles effectués sur le terrain avec J. P. CARROUE, nous ont permis de découvrir à son passage des volantes de quartz.
- l'accident du Bois de Rouet,
- le filon de Ste-Radegonde tangent au microgranite de Pujol-Servant.

2.2. — D'autres linéaments de longueur plus réduite contrôlent l'anomalie étoilée, ce sont en particulier :

- celui du Bois Menu qui correspond à une zone de brèches quartzieuses minéralisées en Sn,
- celui de la Gourdonne qui correspond à un filon de porphyre quartzifère.

#### Le système N 110-140°

Les principaux linéaments de ce système ont été décrits plus haut. L'un d'eux celui d'Echassières-Beauvoir correspond ou est parallèle à la faille qui a récemment été reconnue au Sud du village d'Echassières (5, 14).

#### Le système N 40-60°

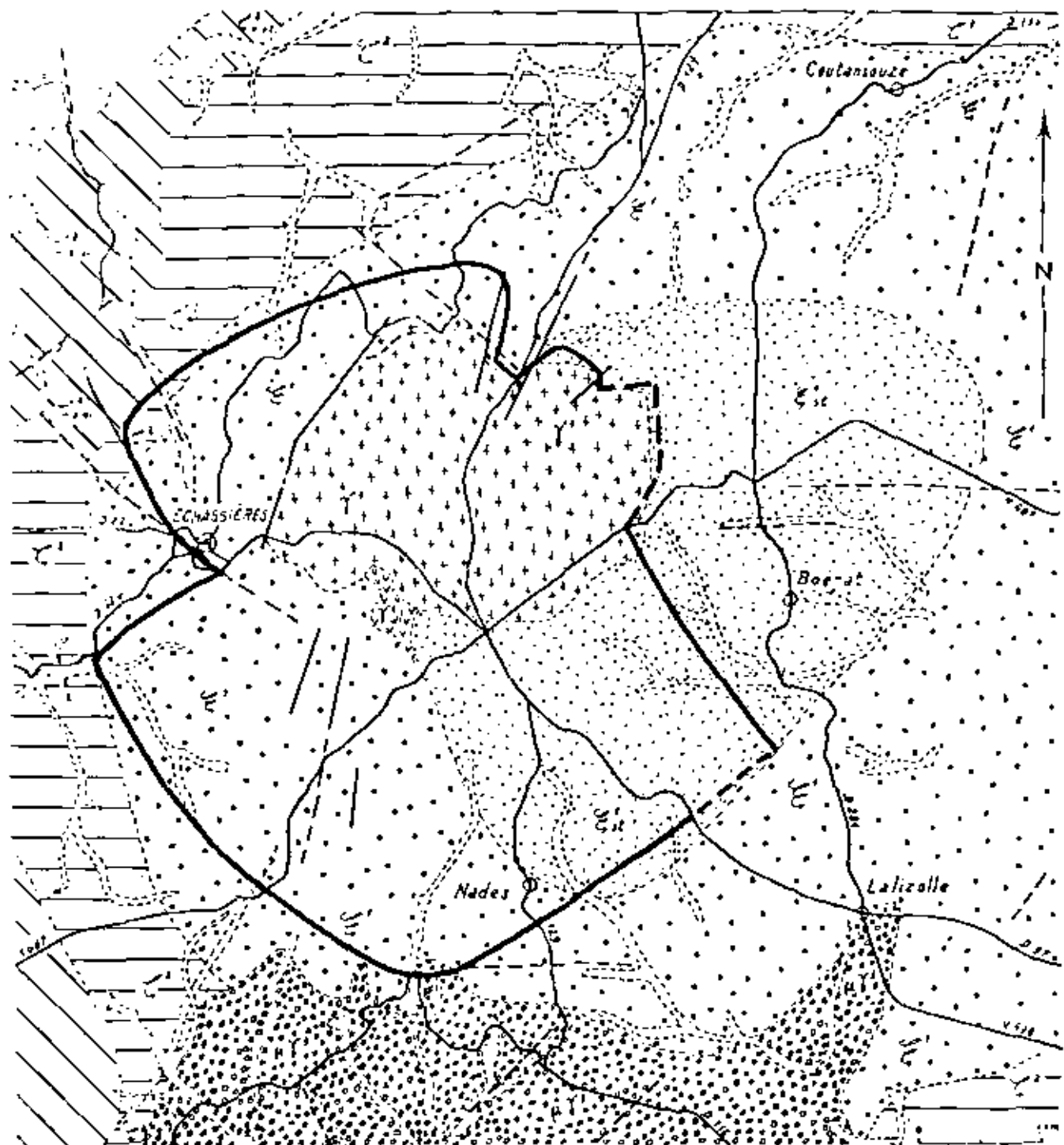
Ici aussi, un des linéaments peut se superposer à un accident connu sur le terrain et confirmé par la géophysique celui des Sources Vives qui passe à 600 m environ au N de Nades.

1

2

3

4



- |  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  | Micaschistes à 2 micas, micaschistes leucocrates, chloritico-schistes. |  | Microgranites subalcalins porphyriques de Pouzol-Servent et filons microgranitiques. |
|  | Micaschistes à staurolite.   |  | Albitite de Beauvoir.  |
|  | Gneiss à 2 micas.  |  | Fautes.  |
|  | Gneiss à 2 micas et sillimanite.                                       |  |  |

Fig. 5. — Anomalie « subcirculaire » sur fond géologique (d'après feuille Gannet à 1/50 000).

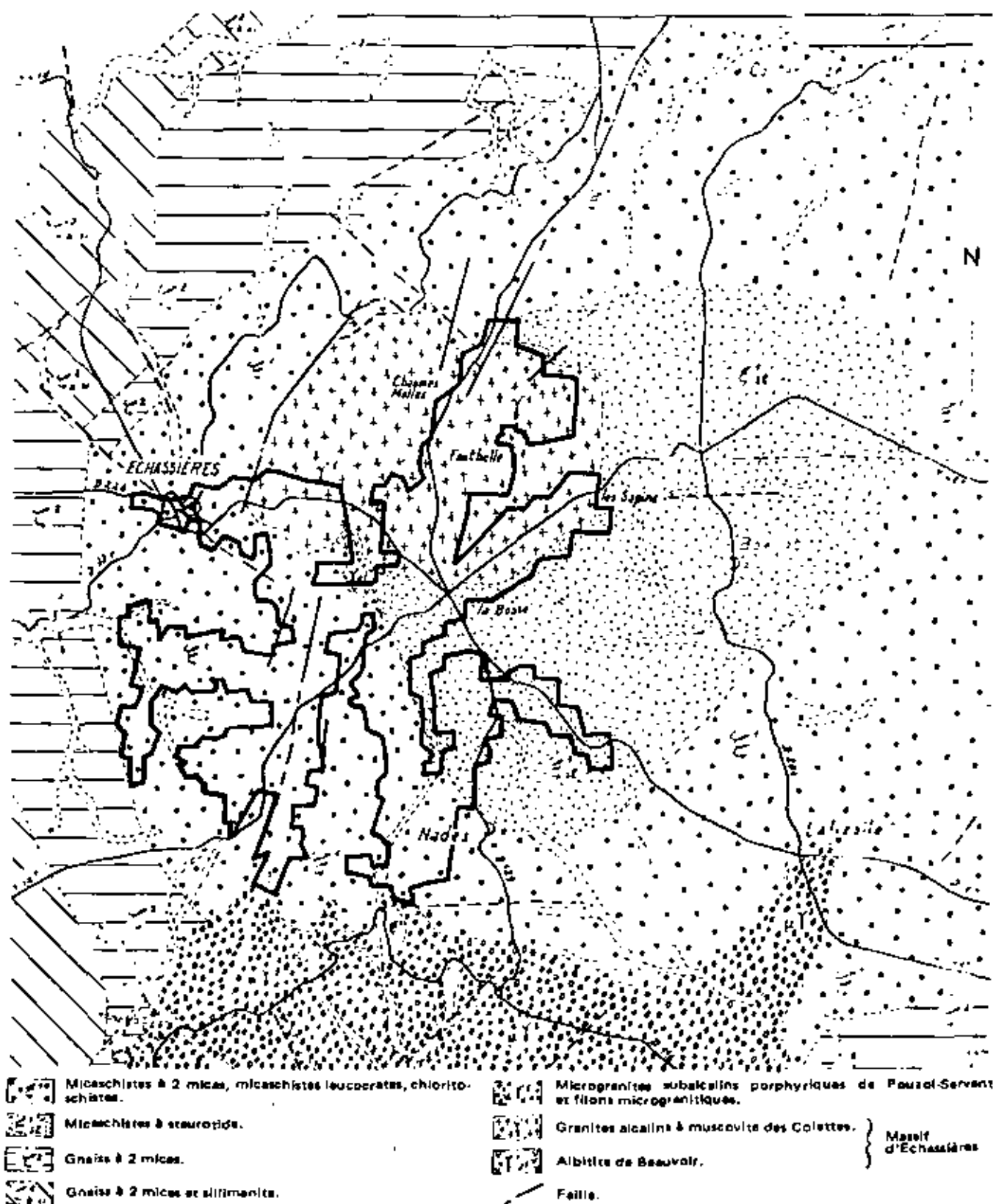


Fig 7. — Anomalie « étoilée » sur fond géologique (d'après feuille Gannat à 1/50 000).

Donc, du point de vue structural, on retrendra le rapport étroit qui existe entre les anomalies de luminance et les linéaments associés d'une part, les limites du granite et les accidents qui l'affectent ou le jalonnent d'autre part.

### III. — Rapport entre les anomalies multispectrales des végétaux et les données géophysiques

Divers travaux géophysiques ont été réalisés sur la zone-est d'Echassières. Nous avons retenu les deux plus récents qui sont ceux de R. GABLE (9) en gravimétrie et ceux de S. LALLIER (14) en magnétisme, résistivité, polarisation spontanée, VLF et gravimétrie.

#### 1. Gravimétrie

R. GABLE différencie du nord au sud (fig. 8), trois zones :

— la zone A, qui correspond à une anomalie négative, et que l'on peut relier à l'affleurement du granite des Colettes, mais au sud de laquelle apparaissent deux indentations :

A1 : remaniée probable du toit du granite au sud-est du village d'Echassières,

A2 : granite de Beauvoir.

— la zone B, d'anomalie positive, qui correspond aux micaschistes et qui apparaît :

• à l'est, très tectonisée,

• à l'ouest, moins tourmentée mais avec une amorce d'îlot négatif près de Bois Menus,

• au centre, au niveau de la N 687, coupée en deux par un axe léger de direction N 20°, au centre duquel, au lieu-dit Bois Rouet, existe un îlot négatif B1.

— la zone C, qui correspond à l'affleurement du microgranite de Pouzol-Servant.

La comparaison entre l'interprétation gravimétrique et l'anomalie circulaire montre qu'il est impossible de déterminer une éventuelle corrélation car le domaine d'étude de R. GABLE n'est pas suffisamment étendu.

En ce qui concerne l'anomalie étoilée qui est, nous le rappelons, contrôlée par les linéaments dont le plus important est celui de Beauvoir, morcelé par les linéaments de direction N 110-140° :

— le linéament de Beauvoir se trouve juste au-dessus de l'axe léger qui prend en écharpe la zone B, il est décroché par un accident de direction N 140° au niveau de l'îlot négatif B1. Nous verrons plus loin qu'en ce point, existe en plus de l'anomalie de luminance, diverses anomalies géochimiques,

— le linéament N 140° qui passe au sud d'Echassières, semble séparer la zone négative A de la zone lourde B.

#### 2. Sondages électriques

Les travaux de S. LALLIER montrent qu'il existe sous les micaschistes une zone de résistance continue dont le toit prend sous la N 687 une forme de gouttière. Cette zone, outre qu'elle correspond à l'axe de décompression révélé par R. GABLE, se trouve à l'aplomb du linéament de Beauvoir.

En définitive, les résultats de l'interprétation de méthodes géophysiques diverses nous montrent l'importance du linéament N 20° dit de Beauvoir, qui au sud du granite, paraît correspondre à une zone faillée. La gravimétrie semble également mettre en évidence deux îlots légers, situés sur l'anomalie étoilée, l'un au sud d'Echassières, l'autre au bois du Rouet et qui semblent révéler sous les micaschistes l'existence de microcoupes du type de celle de Beauvoir.

### IV. — Comparaison entre l'extension des anomalies spectrales des végétaux et celle des anomalies géochimiques

#### 1. Anomalie sub-circulaire

Dans sa partie septentrionale, l'anomalie de luminance suit, tout en la débordant un peu dans les micaschistes, la bordure du granite des Colettes, depuis Echassières jusqu'au lieu-dit « Les Sapins », en respectant les décrochements du Mazet et des Montmins. Dans toute cette zone l'anomalie de réflectance est donc étroitement liée aux concentrations géochimiques du granite à deux micas c'est-à-dire F, Li, Sn, Be et W.

Dans sa partie méridionale, l'anomalie de luminance se situe dans les micaschistes. Elle montre de bonnes corrélations avec l'auréole externe de dispersion des éléments tels que F, Li, As, Be. Cela est particulièrement remarquable autour du village de Nades, où une zone anormale importante de ces quatre éléments semble épouser le contour de l'anomalie multispectrale. Cependant, nous rappelons que les échantillons de roche qui ont été prélevés pour réaliser les cartes géochimiques de référence l'ont été à la maille de 800 m x 800 m. Afin de mieux préciser le rapport existant entre l'anomalie de luminance des végétaux et les anomalies géochimiques révélées par les travaux de G. AUËRT dans le secteur de Nades, nous avons récemment procédé avec la collaboration de J. P. CARROUÉ et son équipe, à une campagne de prélèvements de sols et de végétaux.



Fig. 8. — Hypothèse structurale extrait de GABLE, 1974

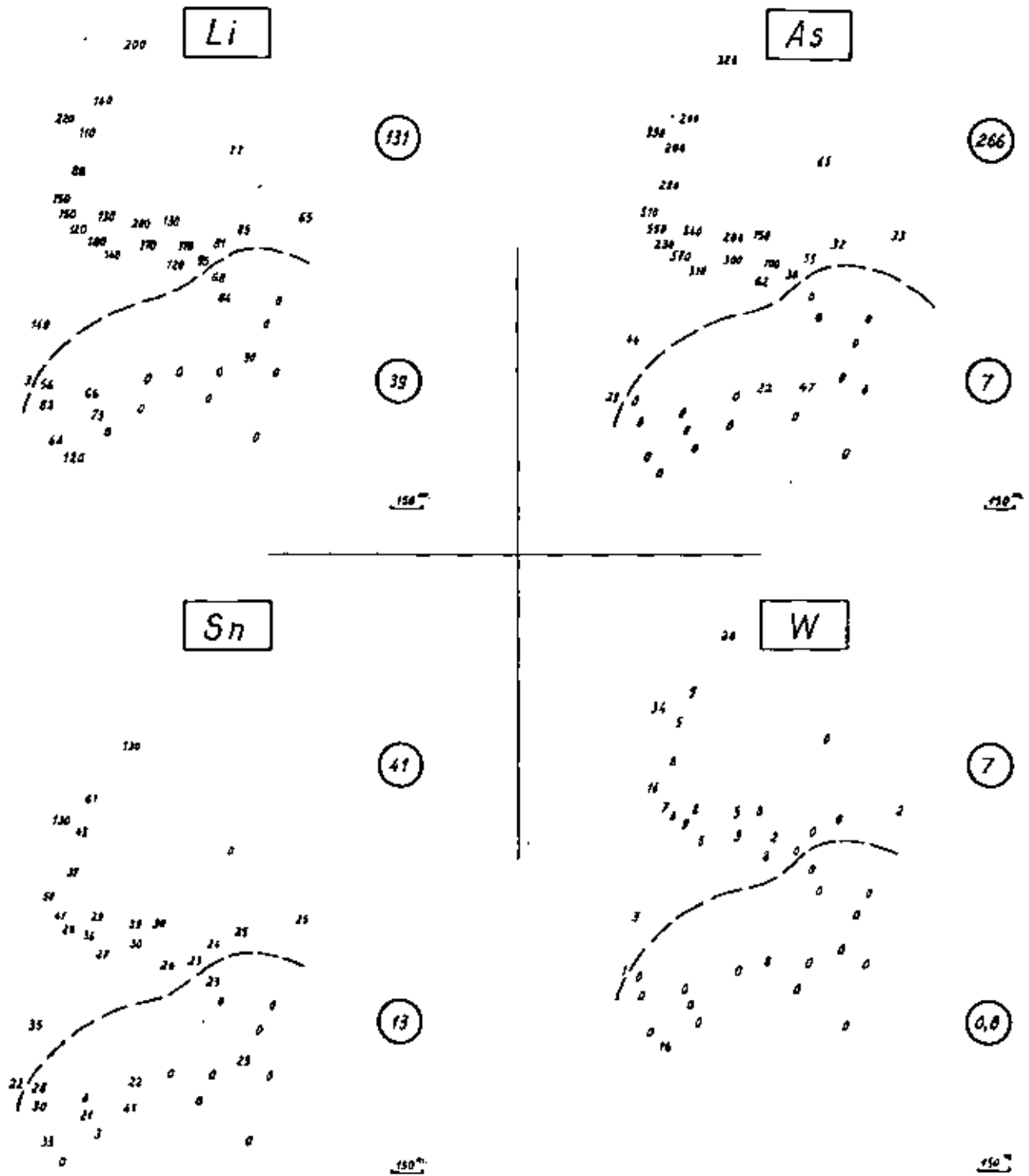


Fig 9 — Région de Nades : géochimie-lactique/sol.

Ces cartes indiquent les teneurs en ppm des quatre éléments les plus remarquables dans la mise en évidence des corrélations-anomalies spectrales des végétaux/anomalies géochimiques — (le chiffre cercle indique la valeur moyenne des teneurs, de part et d'autre de l'enveloppe de l'anomalie spectrale)

Les résultats de l'analyse chimique multi-éléments des sols montrent une bonne corrélation avec l'anomalie spectrale en général, mais ils sont particulièrement probants pour les éléments suivants Li, As, Sn, W et As (voir fig. 9).

Les analyses chimiques de prélèvements d'herbes de prairies n'ont porté que sur l'arsenic et le tungstène. Le tungstène ne se retrouve pas dans les végétaux, alors que l'arsenic s'y concentre en teneurs relativement importantes. De plus l'étude comparative de la zone d'anomalie spectrale et la zone extérieure à l'anomalie montre une bonne corrélation entre l'anomalie biogéochimique et celle de la luminance des végétaux.

| teneurs moyennes ppm | Arsenic   |         |              | Tungstène |     |          |
|----------------------|-----------|---------|--------------|-----------|-----|----------|
|                      | Roche (1) | Sol (2) | Végétaux (3) | Roche     | Sol | Végétaux |
| A                    | 511       | 266     | 48           | 11,9      | 7   | 0        |
| B                    | 12        | 7       | 17,3         | 4         | 0,8 | 0        |

A : — Anomalie spectrale des végétaux ;  
 B : — Zone non anormale ;  
 (1) : Dosages par voie chimique colorimétrique ; (2 et 3) : Dosages au quantomètre (2 : horizon A et 3 : cendres de végétaux).

## 2. Anomalie de forme étoilée

La connaissance géochimique est relativement importante à ce niveau et souligne l'existence de certains axes.

### 2.1. Réflexions sur les données géochimiques

#### Le fluor (fig. 10)

Les plus fortes anomalies en fluor (> 9 000 ppm) s'alignent suivant un axe N 20° entre le granite de Beauvoir et le Bois du Rouet, puis se concentrent en un point situé à 1 km au SE d'Echassières.

Les courbes de moins fortes concentrations s'ordonnent suivant deux directions d'une part N 20° direction qui se prolonge vers le nord bien au-delà des limites du granite, et d'autre part N 140° entre Echassières et les Quéfoux.

#### Le Lithium (fig. 11)

Ici aussi les plus fortes concentrations (> 1 500 ppm) suivent les directions citées plus haut, N 20° entre Beauvoir

et le Bois du Rouet, mais cet axe se prolonge également loin vers le Nord, N 140° entre Echassières et les Quéfoux. Il faut aussi signaler l'existence d'une direction de minéralisation N 140° au niveau du Bois du Rouet vers les Pierres cassées, puis également quelques fortes concentrations ponctuelles aux Sapins, et au Nord de Montmins.

#### L'Étain, l'Arsenic, le Béryllium

De nouveau, l'axe des plus fortes concentrations emprunte la direction N 20°, et passe par le Bois de Rouet, Beauvoir et Montmins.

Deux axes Nord-Sud apparaissent ici entre les Pierres Cassées et Chaillat, et au Sud Est d'Echassières. L'arsenic et le béryllium sont très concentrés selon la direction N 140°, entre Beauvoir et les Quéfoux.

#### Le Tungstène

Il s'ordonne aussi le long de l'axe N 20° entre le Bois du Rouet et Montmins. Il est présent également à l'Ouest de la Bosse au niveau du stockwerk. La direction N 140° entre Echassières et le Quéfoux apparaît clairement dans les concentrations plus faibles.

En définitive, les mêmes directions privilégiées des minéralisations apparaissent toujours et correspondent à celles mises en évidence par l'étude linéamentaire :

- fortes concentrations en F, Li, Sn, As, Be et W selon l'axe N 20° qui passe par les Montmins, Beauvoir, Bois du Rouet,
- concentrations plus faibles en F, Li, As et Be selon l'axe N 140° entre Echassières et les Quéfoux.
- concentrations élevées en Sn, As et Be selon un axe NS entre les Pierres Cassées et Chaillat.
- ponctuellement :
  - Les Chaumes Molles (Sn et Be),
  - Les Sapins (F, Li et P),
  - Les Bois des Menus (Be),
  - La Gourdonne (Be et Sn),
  - Au SE d'Echassières (Sn, As, Be, W et P).

### 2.2. Rapports entre les données géochimiques, l'anomalie étoilée et les linéaments associés

D'une manière générale, l'anomalie de forme étoilée et les anomalies géochimiques sont bien corrélées dans les sommets des buttes (Beauvoir, La Bosse, La Pyramide, Bois du Rouet et Bois des Menus, Fontbelle, etc...). Par contre il existe une anomalie de luminance dans le fond de certains talwegs (La Gourdonne, le SE des Montmins) où aucune anomalie géochimique n'a été relevée.



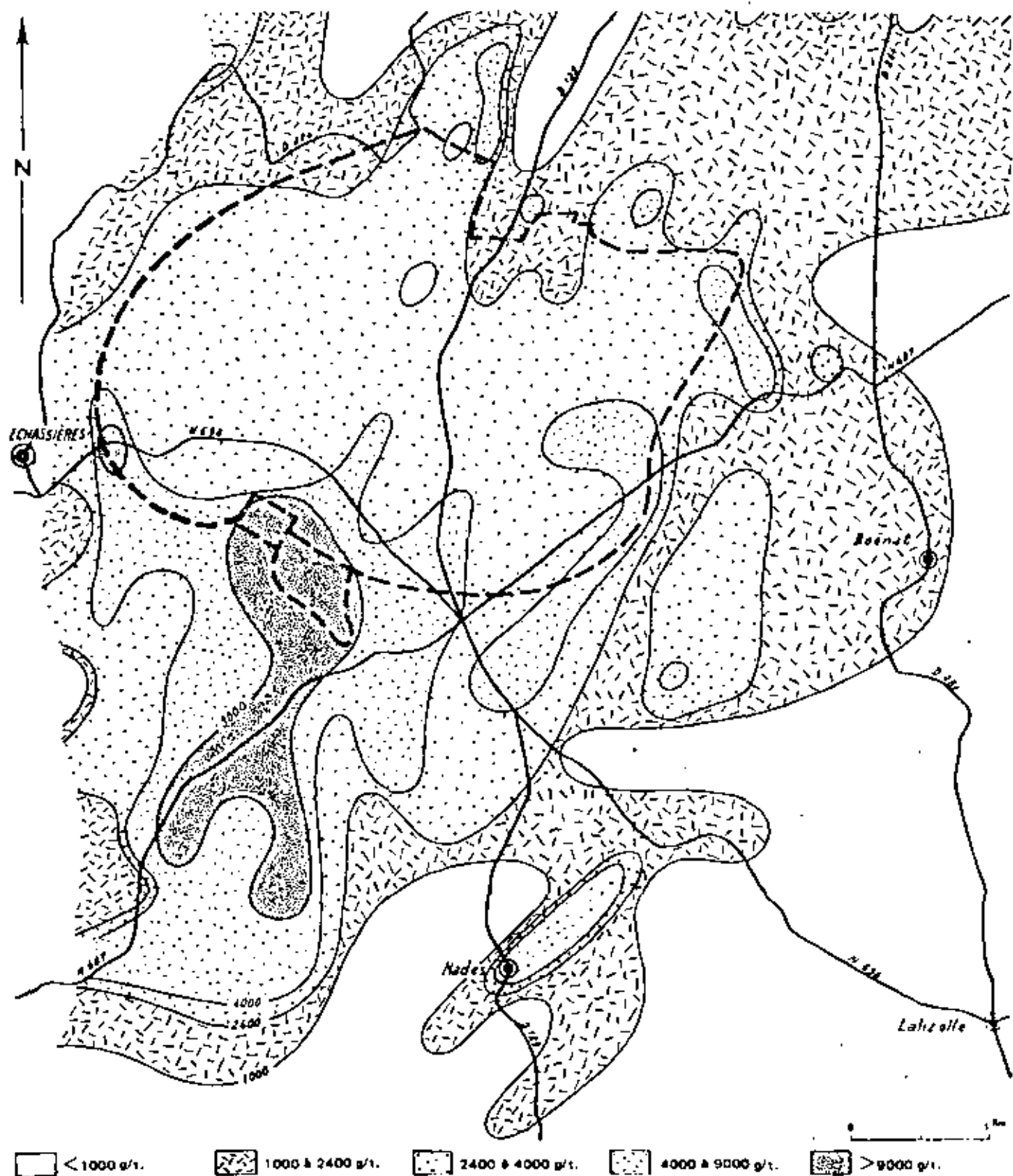


Fig 10. — Distribution du Fluor à Echassières (d'après G. AUBERT, 1966)

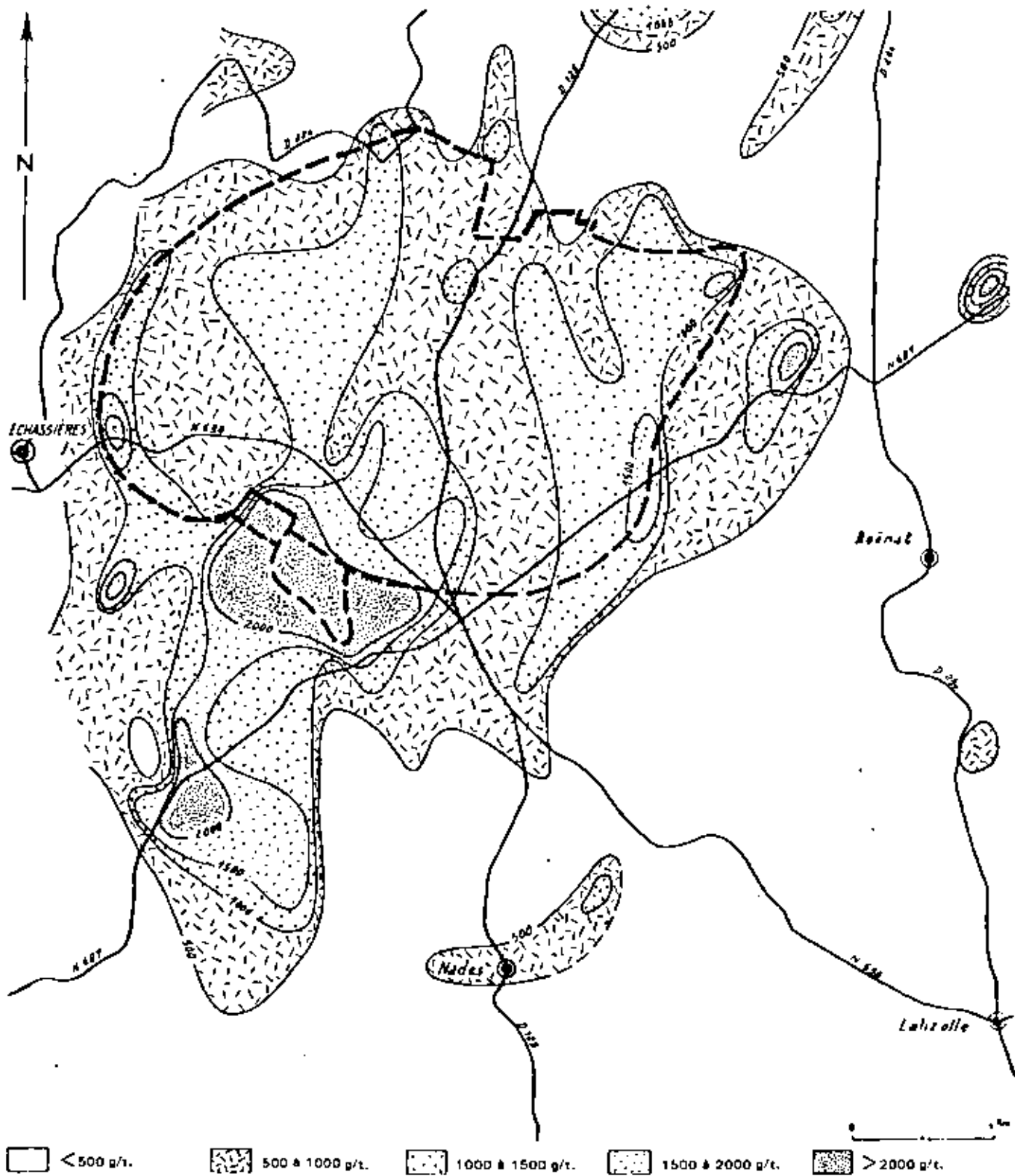


Fig. 17. — Distribution du Lithium à Echassières (d'après G. AUBERT, 1986)

Cependant, ce qui frappe le plus, est le rapport étroit qui existe entre les principaux linéaments mis en évidence sur les images Landsat (Beauvoir N 20°, Echassières N 140°, Sources Vives Bois du Rouet N 140°) et les directions privilégiées que prennent les minéralisations.

Seul l'axe de minéralisation orienté NS entre les Pierres Cassées et Chaillat, n'est relié à aucune anomalie de la luminance ou à un linéament associé.

## V. — Conclusions partielles

Des études comparatives qui précèdent se dégagent certaines conclusions dont l'importance varie selon qu'elles se rapportent à l'anomalie étoilée ou circulaire.

### 1. L'anomalie sub-circulaire

Deux constatations ressortent de l'étude comparative :

— dans sa partie nord, l'anomalie sub-circulaire est étroitement corrélée avec le contour du granite, et surtout avec les anomalies géochimiques liées à la coupole,

— dans sa partie sud, l'anomalie correspond à l'auréole externe de dispersion de divers éléments géochimiques dans les micaschistes.

Dans les deux cas les concentrations géochimiques ne sont pas très élevées à l'exception de celles de Nades.

Selon G. AUBERT (1), la dispersion très remarquable des minéralisations au sud du granite d'Echassières, pourrait

s'expliquer par l'existence en profondeur d'un batholite minéralisé non affleurant.

### 2. L'anomalie de forme étoilée

Son intérêt réside surtout dans sa corrélation avec le système de linéaments.

En effet les linéaments qui la jalonnent et la contrôlent sont en partie connus sur le terrain sous forme de réseau de failles ou de filons plus ou moins minéralisés. D'autre part les interprétations géophysiques accentuent l'importance d'au moins deux de ces linéaments, le linéament de Beauvoir et celui d'Echassières qui ne sont jusqu'à présent que partiellement connus sur le terrain et dont la vision depuis le satellite donne une vue synthétique.

Sur le plan de la géochimie, le réseau de failles qui jalonne le granite est considéré comme un drain important pour les solutions minéralisées issues des coupoles. Il semble cependant que les principaux linéaments dont nous avons parlé plus haut jouent un rôle de première importance dans la dispersion des minéralisations. En effet, les plus fortes concentrations sont alignées le long des linéaments de Beauvoir et d'Echassières.

Il est aussi remarquable d'observer que les deux « tops » des minéralisations se trouvent :

- au niveau du granite de Beauvoir ;
- au niveau du Bois du Rouet ;

qui sont deux zones d'intersection entre le linéament de Beauvoir et le linéament N 140° E (Echassières et Sources Vives). Ce point très minéralisé du Bois du Rouet, se trouve également sur une anomalie gravimétrique légère, et pourrait correspondre à une microcoupole, du type de celle de Beauvoir.

## Conclusion générale

L'étude des images satellites et des rapports de canaux a permis de mettre en évidence deux anomalies de luminance dans la forêt des Colettes, dans la région d'Echassières.

L'anomalie circulaire, mise en évidence dans la végétation basse apparaît surtout en avril, et s'atténue en juin pour disparaître en septembre. Du point de vue phénologique elle semble être en relation avec le début du stade végétalif à une période où prairies et cultures ont de jeunes pousses suffisamment couvrantes pour masquer le sol nu. Du point de vue des minéralisations, elle semble en relation, au Nord avec celles qui sont liées au granite, au Sud avec l'auréole de dispersion dans les micaschistes.

Bien qu'il soit nécessaire de le confirmer par les études biogéochimiques, nous pouvons avancer l'hypothèse d'une anomalie de luminance des végétaux en relation avec des anomalies géochimiques. Cette hypothèse est confirmée par les résultats positifs obtenus à partir des échantillons prélevés de part et d'autre de l'anomalie de luminance. Elle confirmerait la thèse de G. AUBERT, qui suppose, à partir des courbes d'isoteneurs géochimiques, l'existence au Sud du granite d'Echassières d'un batholite non affleurant mais très minéralisé.

L'anomalie étoilée, apparaît en juin c'est-à-dire dans la période où les hêtres ont de jeunes feuilles, et où les chênes sont à peine feuillés. C'est donc ici également le

début du stade d'activité chlorophyllienne chez les végétaux arbustifs. L'anomalie disparaît en septembre avec la maturation des feuilles. Cette anomalie et les linéaments qui l'ordonnent montrent un rapport étroit avec les plus fortes teneurs géochimiques. Les linéaments semblent contrôler les minéralisations dans deux directions principales qui sont N 20° et N 140° avec deux zones où convergent les données de la géophysique de la géochimie et de la télédétection :

— la granite de Beauvoir (intersection des linéaments de Beauvoir N 30° et d'Echassières N 140°).

— Bois du Rouet (intersection des linéaments de Beauvoir et des Sources Vives N 140°) qui pourrait correspondre à une micro-coupe minéralisée non affleurante.

L'anomalie étoilée et les linéaments seraient donc des révélateurs d'accidents plus ou moins visibles en surface, qui contrôlèrent la mise en place des minéralisations issues de coupoles du type de celle de Beauvoir.

Ces premiers résultats confirment ce que laissent entrevoir les travaux du B.R.G.M. (J. M. BROUSSE, 2) ainsi

que ceux de la NASA (7) et du Geological Survey (4), c'est-à-dire la possibilité d'obtenir des informations géologiques grâce à la végétation. L'originalité du travail présenté ici, aura été d'ouvrir un nouveau domaine d'étude, celui des zones cultivées, céréales et prairies.

Pourtant, nous ne devons pas exclure la possibilité que ces phénomènes aient été exceptionnellement révélés grâce aux périodes particulièrement sèches de 1975 et 1976. De ce fait, il sera utile à l'avenir, d'une part d'étudier les images Landsat plus récentes sur la région d'Echassières aux périodes propices pour la détection de ces phénomènes, et d'autre part de généraliser la méthode sur d'autres sites.

Si la reproductibilité du phénomène est confirmée, et si les analyses sol et végétaux en forêt réalisées en juin 1979 sont aussi positives que celles des prairies, il sera également intéressant, afin d'affiner la méthode, de rechercher dans le domaine de l'anatomie, de la physiologie et des propriétés spectrales fines de ces végétaux, les processus qui en font des révélateurs potentiels des phénomènes chimiques et structuraux de sub-surface.

## Bibliographie

(1) AUBERT G. (1969). — « Les coupoles granitiques de Montebrias et d'Echassières et la genèse de leurs minéralisations ». *Mémoire du B.R.G.M.* n° 46.

(2) BROUSSE J. M. (1975). — « La télédétection en géologie structurale (Massif central - France) ». Thèse Orléans. *Bull. B.R.G.M.*, 2<sup>e</sup> série, section II, n° 6.

(3) CANNEY F. C. (1970). — « Remote detection of geochemical soil anomalies ». *Geology* volume, 2nd annual aircraft program review (Houston Texas, NASA) 1-8.

(4) CANNEY F. C. (1978). — Mesures des anomalies thermiques de la végétation dues à des anomalies de contenu en eau des plantes, liées elles-mêmes à des anomalies géochimiques du sol. Présentation orale au séminaire sur la télédétection spatiale appliquée à la géologie (Washington D.C.).

(5) Carte géologique de la France à 1/50 000<sup>e</sup> GANNAT, feuille XXV, 29-645.

(6) Carte de la végétation de la France à 1/200 000<sup>e</sup> MOULINS n° 46, 1974.

(7) COLLINS W., RAINES G. L. et CANNEY F. C. (1977). — Airborne spectroradiometer discrimination of vegetation anomalies over sulfide mineralisation. *A remote sensing*

technique. Association of geoscientist for international development. AGID, Caracas. Background document n° 48.

(8) FONTANEL A., LALLEMAND C., LEGENDRE G., RIVEREAU J. C. et THOMAS G. (1976). — Comparaison des images et des classifications multispectrales obtenues à partir des satellites LANDSAT, SKYLAB et du Scanner aéroporté DAEDAL. *Compte rendu des jour. de Téléd.*, Toulouse, octobre, pp. 499-540.

(9) GABLE R. (1974). — Un exemple d'application de la méthode gravimétrique à l'étude structurale d'une coupole granitique : La coupole d'Echassières (Allier). *B.R.G.M.*, 74 SGN 406 BSS.

(10) GAUSMAN H. W. (1974). — Leaf reflectance of near-infrared. *Photogrammetric engineering*, pp. 183-191.

(11) GIRARD C. M. (1976). — Études multispectrales à faible altitude en agronomie. *Compte rendu des journées de télédétection*. Toulouse, octobre 1976, pp. 59-65, tome 1.

(12) KNIPLING E. B. (1970). — Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote sensing of environment*, pp. 155-159.

(13) LALLEMAND C. et THOMAS G. (1977). — Traitement numérique des images multispectrales. Exposé présenté lors de la 3<sup>e</sup> réunion de la commission III du CFC le 09 mars 1977.

(14) LALLIER S. (1977). — Étude géologique et géophysique au Sud-Est du Massif granitique d'Echassières (Allier). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle présentée à l'université d'Orléans.

(15) Monographies agricole départementales : Allier, 1959.

(16) PRESS N. P. et NORMAN J. W. (1972). — Detection of orebodies by remote sensing, the effects of metals on vegetation. *Institution of mining and metallurgy, transaction*, vol. 81, Bull. 789.

(17) Recensement général de l'agriculture 1970-71. Allier (1972).

(18) Recensement général de l'agriculture 1970-71. Puy-de-Dôme (1972).

(19) SCANVIC J. Y. (1972). — Carte des alignements structuraux observés sur les images orbitales ERTS, à 1/1 000 000.

(20) SCANVIC J. Y. (1972). — Télédétection thermique d'une formation géologique partiellement masquée (Pays de Bray - France). *Revue de photointerprétation* 72, 1. Editions Technip.

(21) WEBER F. P. (1972). — Remote sensing to detect stress in forest. *Photogrametric engineering*, pp. 163-175.

(22) Yost E. et WENDEROTH S. (1971). — The reflectance of spectra of mineralized trees. *Proc. 7th Symp. remote sensing environment* (Ann Arbor Michigan), pp. 269-284.

## évolution des méthodes de prospection géochimique au B.R.G.M.

E. WILHELM (\*)

### 1. RAPPEL SUCCINCT SUR L'APPLICATION DE LA GEOCHIMIE EN RECHERCHE MINIERE

Les métaux d'une minéralisation située près de la surface sont en partie dispersés sous l'effet de l'altération météorique soit sous forme de minéraux détritiques ou néoformés, soit sous forme d'éléments solubles : l'objet de la prospection géochimique consiste ainsi à étudier la distribution des éléments à la surface de la lithosphère en analysant les matériaux accessibles à l'échantillonnage direct — roches, sols, sédiments, végétaux, eaux... — en vue de détecter des "anomalies" liées à la proximité d'un corps minéralisé.

D'application relativement récente, cette technique de recherche est particulièrement adaptée aux régions climatiques à forte couverture pédologique ; d'abord mise en œuvre, vers les années 60, pour rechercher l'extension de gîtes ou d'indices connus, elle prit rapidement un caractère plus systématique pour devenir également un outil de prospection stratégique. Son développement s'est appuyé autant sur des critères empiriques, dégagés et affinés par l'expérience, que sur l'amélioration des connaissances plus théoriques des cycles géochimiques.

*L'articulation, au stade opérationnel, d'une campagne géochimique peut être schématisée ainsi :*

- Reconnaissance stratégique par prélèvements de sédiments de ruisseau et/ou de sols (en fonds de vallons) à des mailles variables en fonction des objectifs et des conditions régionales ; 1 éch. pour 2 à 3 km<sup>2</sup> à 4 à 6 éch. par km<sup>2</sup> en moyenne. Notons que l'élargissement de la maille d'échantillonnage est limité par les distances maximum de dispersion des métaux autour des gîtes, d'ordre kilométrique en moyenne ; ceci interdit l'utilisation de l'outil géochimique comme technique de grande reconnaissance, à l'exemple des méthodes de géophysique aéroportée.
- Contrôle tactique des points anormaux par prélèvements de sols à maille régulière, hectométrique à décamétrique.

(\*) Chef de la Division de Géochimie Appliquée au Département des Gîtes Minéraux, SGN - B.R.G.M. B.P. 6009 - 45 018 Orléans Cédex.

- Contrôle de l'enracinement des "tops" d'anomalies tactiques par prélèvements tarière, puits ou tranchées, afin de focaliser au mieux, en association avec les données géologiques et éventuellement les techniques géophysiques, l'implantation des sondages.

## 2. PRINCIPALES AMELIORATIONS INTERVENUES CES DERNIERES ANNEES

Elles découlent :

- de l'évolution des techniques analytiques d'une part,
- des apports liés à une meilleure définition des cycles géochimiques d'autre part.

### 2.1. Les progrès analytiques réalisés :

#### 2.1.1. Le dosage multiéléments

Avec le perfectionnement des méthodes spectrales, l'analyse des prélèvements pour un ou deux métaux a pu graduellement être remplacée par le dosage multiélémentaire.

En effet, les géochimistes ont très vite perçu l'avantage d'exploiter les possibilités d'appareils pouvant effectuer l'analyse simultanée de 10, 20 voire 30 éléments sur le même échantillon, le gain d'information compensant largement le surcroît de dépenses.

Si les méthodes classiques de colorimétrie ou d'absorption atomique restent toujours utilisées à l'heure actuelle, principalement au niveau des campagnes tactiques, elles tendent progressivement à être remplacées pour les prospections régionales par les techniques spectrométriques. Sont opérationnelles au B.R.G.M. :

#### - la spectrométrie d'émission à lecture directe (quantomètre)

Il s'agit d'un appareillage maintenant classique, qui peut doser simultanément de 20 à 30 éléments traces et fournir également une bonne estimation du niveau de teneurs des éléments majeurs.

Les impératifs de rendement compatible avec le très grand nombre d'échantillons prélevés, ont pu être surmontés grâce à l'utilisation d'une alimentation par ruban (tape-machine). Dans le même temps, les interférences spectrales et les effets de matrice ont été corrigés à l'aide de programmes statistiques prévisionnels. La précision des analyses est variable selon les éléments : elle est de l'ordre de 15 à 30 % relatif.

#### - la spectrométrie d'émission à plasma

Elle permet le dosage d'une vingtaine d'éléments préalablement mis en solution. Les interférences sont minimisées par la qualité du système dispersif et par un système inédit de réglage des fentes ; elles sont en outre corrigées par voie chimique (solutions tampon) et par calculs sur mini-ordinateur relié au spectromètre. La qualité des résultats analytiques fournie par cette technique est comparable à celle des dosages obtenus par absorption atomique.

### 2.1.2. Les avantages de la prospection multiéléments

L'information multi-éléments, tout en valorisant le prélèvement, rendu de plus en plus coûteux par l'accroissement du prix de la main-d'œuvre et l'élargissement des zones de prospection, a fondamentalement modifié les critères d'interprétation et de sélection des anomalies initialement basés sur une démarche exclusivement statistique.

Elle a ainsi conduit, au stade de la reconnaissance régionale :

— à permettre une prospection exhaustive des concentrations cachées ou de type inédit, répondant en particulier à la notion "d'inventaire" d'une région.

— à ne plus définir une anomalie à partir du seul niveau de teneurs d'un élément, mais en tenant compte de son "environnement géochimique" ; celui-ci sera précisé par la répartition des autres éléments traces dosés et en particulier par les associations d'éléments mises en évidence. Ainsi par exemple, une anomalie en plomb ou zinc pourra être valorisée par la présence "d'indicateurs" de sulfures tels AG, Bi, Sb, As... , des valeurs en cuivre relativement contrastées, de l'ordre de 200 ppm, seront au contraire dépréciées dans un contexte de roches basiques, défini par une augmentation simultanée des contenus en Ni, Cr, V, Fe...

— à justifier une réduction de la maille d'échantillonnage par l'accroissement de l'information collectée en chaque station.

La mise en œuvre, à l'échelle opérationnelle, de ces dosages multiéléments a naturellement augmenté, d'une manière considérable, le volume de l'information numérique à traiter, que seul l'ordinateur couplé à un moyen de visualisation était à même de prendre en compte ; ceci a nécessité l'adaptation et le développement de programmes informatiques spécifiques de calcul et de report des données.

### 2.1.3. Expérience acquise par le B.R.G.M. dans le domaine de la prospection multiéléments

#### Au niveau de la prospection régionale

De par l'importance des données recueillies, la technique géochimique nécessite une bonne intégration des diverses opérations à mettre en œuvre : échantillonnage, analyse, traitement, stockage, comme cela apparaît, à titre d'exemple, sur l'organigramme de la figure 1.

Depuis 1970, on peut estimer à plus de 150 000 le nombre d'échantillons géochimiques prélevés par les équipes du B.R.G.M. tant en métropole qu'à l'Étranger (Zaïre, Gabon, Canada, Italie, Iran, Soudan...) et analysés en multiéléments. A ce sujet, mentionnons en particulier l'important programme géochimique d'inventaire des ressources minérales de la France (et de la Guyane) en cours d'exécution.

L'expérience ainsi acquise par l'exploitation systématique de l'information multivariable collectée a permis d'affiner, petit à petit, les techniques opérationnelles ; les principales retombées concernent d'une part certaines méthodes de trai-



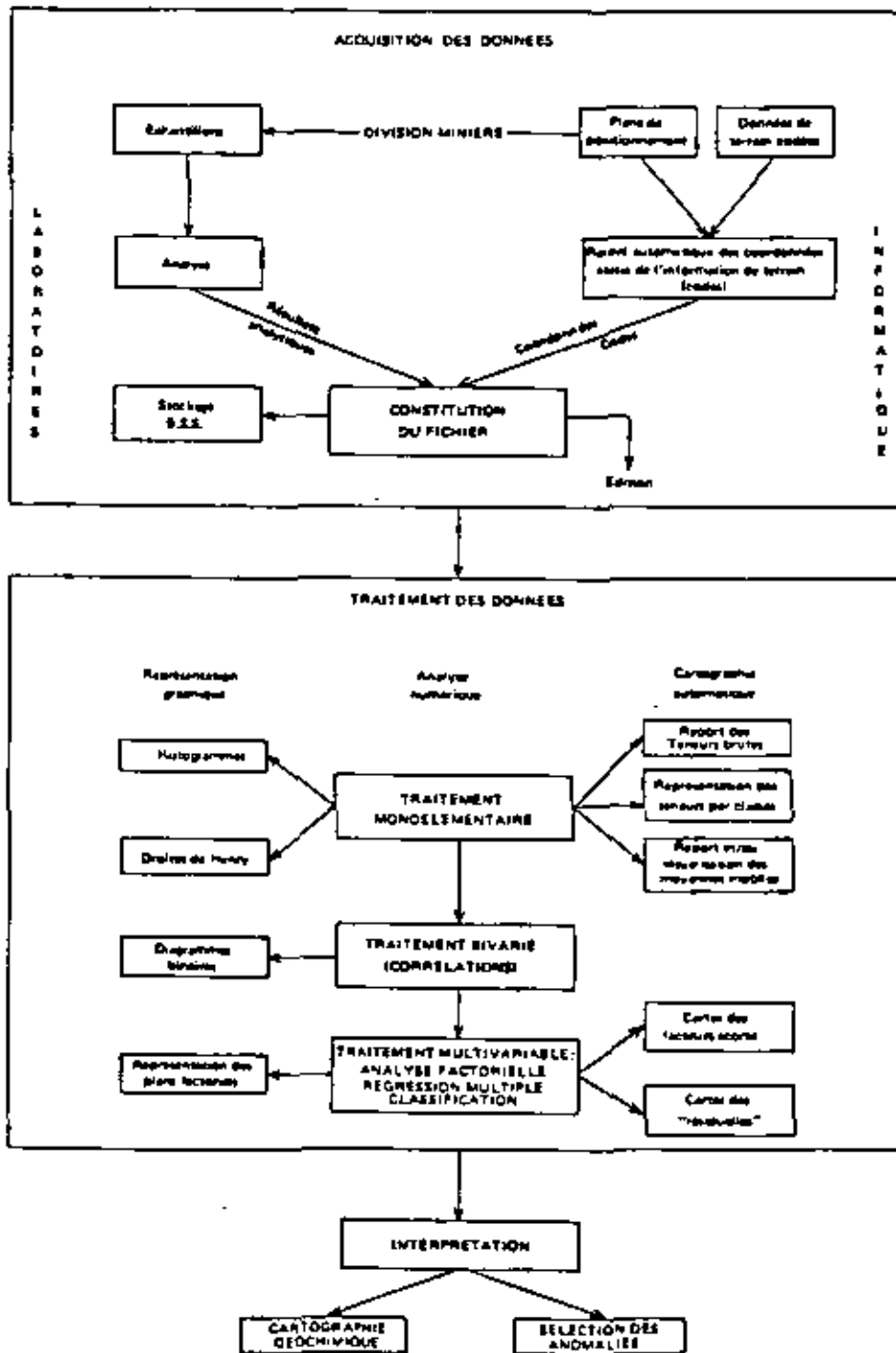


Figure 1



tement statistiques et d'autre part le renouvellement de notre conception sur la dispersion des métaux autour des pltes.

#### *Evolution des techniques de traitement des données géochimiques*

Au niveau de l'analyse numérique, peu de modifications sont intervenues dans la mise en œuvre des méthodes statistiques mono-élémentaires (calcul des paramètres de distribution) et de l'analyse bivariée (corrélations entre éléments).

Les méthodes de report et de visualisation des données ont par contre subi diverses adaptations et perfectionnements récents ; mentionnons à ce sujet l'intérêt de la représentation, à petite échelle, des moyennes mobiles de divers éléments (\*); celles-ci fournissent une très bonne image, souvent surprenante et inédite, des fluctuations régionales des fonds géochimiques ; elles permettent la définition d'unités géochimiques variées qui complètent en général utilement l'information cartographique disponible et précisent en particulier l'environnement spécifique des diverses anomalies mises en évidence. Un exemple d'une telle cartographie géochimique est donnée figure 2. Nous y remarquons en particulier la mise en évidence de "structures" NW-SE qui n'apparaissaient pas sur la carte géologique.

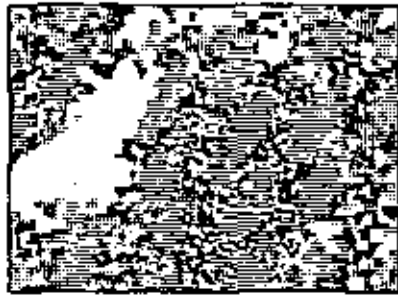
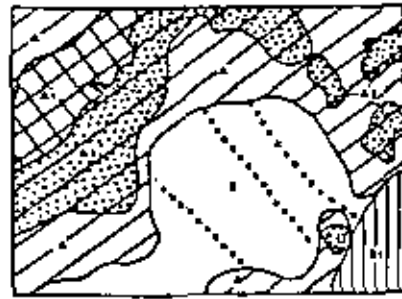
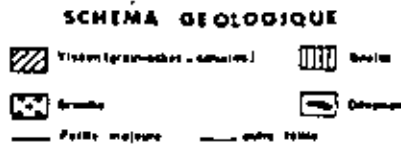
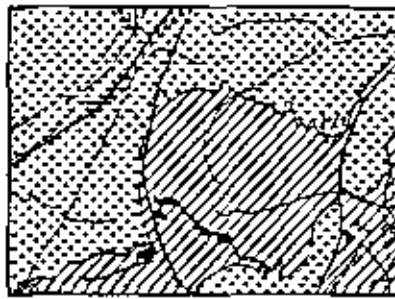
L'utilisation des techniques de traitement multivariable a de même évolué, tant dans leur concept que dans leur mise en œuvre.

D'une manière générale, les différents modes d'analyse factorielle se sont révélés assez décevants pour la sélection des anomalies, car celles-ci constituent le plus souvent, dans une recherche régionale, une population trop faible pour être isolée par cette technique ; ils continuent néanmoins à être appliqués en tant qu'outil de cartographie géochimique.

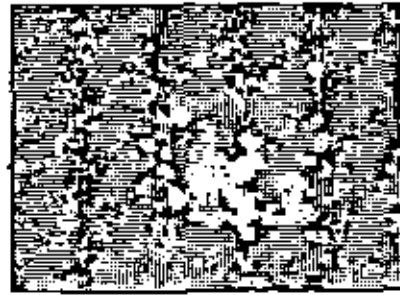
Par contre, les techniques de régression ont connu un net développement car elles sont mieux adaptées à la recherche et la définition d'anomalies.

La régression, suivie du calcul des résidus, a pour objet de relier les variations d'une variable (dite variable dépendante), aux variations d'une ou plusieurs autres variables (dites variables explicatives) ; elle permet souvent de s'affranchir d'une partie du fond géochimique et de ne garder que certaines variables résiduelles facilitant par exemple la distinction entre anomalie formationnelle et anomalie à caractère métallogénique. L'application du calcul de régression nécessite cependant une bonne connaissance préalable des variables susceptibles d'expliquer, pour un métal donné, les fluctuations dues aux variations de la lithologie ou encore aux phénomènes de dispersion supergène. C'est ainsi que nous avons été amenés à recenser, à partir de l'information collectée au cours des premières campagnes de prospection de l'inventaire métropolitain (portant sur environ 15 000 échantillons), les éléments les plus fréquemment associés aux principaux métaux de base Cu, Zn, Pb. Les résultats de cette enquête, ont montré que les différentes variables explicatives des teneurs en cuivre peuvent être regroupées en deux catégories :

(\*) Barbier J., Lecuyer P., 1976. Une technique de cartographie automatique à partir de données géochimiques. *Bull. B.R.G.M.* (2), 11, 1.



Ni 7 ppm 120



Sm 9 22



Zr 100 100



Cr 10 200

Figure 2

— les variables lithologiques, tributaires de l'environnement géologique comprenant des éléments tels Co, Fe, V, Ni, Cr associés ou non suivant le contexte à Ba ou Be.

— les variables dites "supergènes" associant principalement P, Mn et Co (éléments participant aux phénomènes de coprécipitation et de "scavenging"). Il est ainsi proposé de régresser (régression linéaire) le cuivre par rapport à ces deux variables lithologiques et "supergènes".

Les valeurs résiduelles en cuivre sont obtenues en retranchant les valeurs calculées des teneurs observées. Des résultats similaires ont été obtenus pour le zinc et l'équation de régression proposée est du même type que pour le cuivre.

Aucune association systématique avec le plomb n'a pu, par contre, être observée, ce qui confirme l'indépendance de cet élément vis-à-vis de la lithologie et des phénomènes supergènes.

Un exemple de régression appliquée aux teneurs en zinc obtenues dans la région du Massif Central est donné figure 3. Les résultats sont présentés au moyen de trois différents types de visualisation. Les teneurs résiduelles observées s'expliquent par des facteurs autres que la lithologie et les "concentrations" pédologiques, constituent des objectifs de contrôle prioritaire.

Parmi les autres techniques multivariées utilisées récemment, signalons certains programmes de classement faisant avant tout référence à l'expérience acquise.

Ces programmes permettent de comparer la composition d'échantillons récoltés en prospection à celle d'échantillons de référence de nature et de provenance connues. La comparaison se fait sur la base d'un indice de ressemblance, calculé en fonction des différences de teneurs (pour plusieurs éléments) entre les échantillons à identifier et les échantillons de référence : plus faibles sont ces différences et plus faible est l'indice, donc meilleure la ressemblance entre deux échantillons confrontés.

Ce genre de traitement des données présente l'avantage par rapport aux traitements statistiques classiques de se perfectionner et de devenir de plus en plus efficace au fur et à mesure de son utilisation, en intégrant peu à peu l'expérience acquise : il nécessite cependant, et ceci constitue un handicap certain, des données homogènes, correspondant à un même type d'analyse.

#### *Amélioration de nos connaissances sur le comportement supergène des éléments traces*

L'exploitation systématique de l'importante information géochimique obtenue tant en France qu'à l'Étranger a permis de préciser la répartition des éléments traces dans les profils d'altération, en tenant compte en particulier de leur environnement climatique et métallogénique.

Ainsi, en métropole (\*) (zone climatique tempérée), l'obtention de très nombreuses données analytiques sur des gîtes variés, exploitées par traitement multi-

(\*) Barbier J., Wilhelm E., 1978, Superficial geochemical dispersion around sulphide deposits. Some examples in France. *Geochemical Exploration*, à paraître.

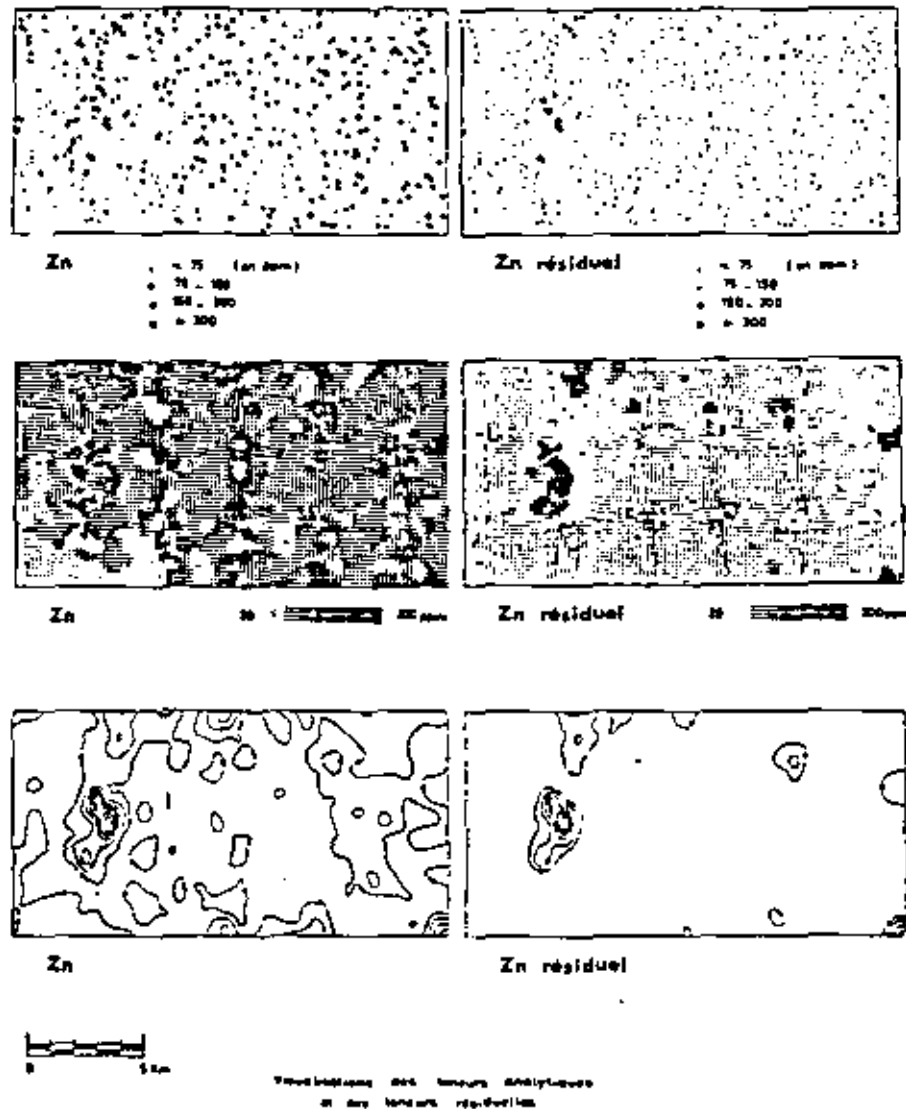


Figure 3

variable (par analyse factorielle, qui donne d'excellents résultats à échelle détaillée), a mis en évidence l'existence d'un certain nombre de règles constantes dans la répartition superficielle des métaux autour des gîtes. Il y a, d'une manière très générale, une grande similarité entre les associations géochimiques observées dans les sols et alluvions et celles des produits d'oxydation des minéralisations sous-jacentes (minéraux supergènes, "fragments ferrugineux" du type chapeaux de fer, débris de roches plus ou moins minéralisés...).

On est ainsi conduit à admettre, contrairement aux schémas classiques, que la dispersion superficielle des métaux est essentiellement d'ordre mécanique. Une telle migration est favorisée par les phénomènes de gélifications produits lors des épisodes de glaciations pléistocènes. L'idée ancienne d'une fixation des métaux sur des argiles ou des matières organiques doit être abandonnée dans bien des cas, au moins en ce qui concerne les anomalies trouvées autour de gîtes métallifères. Cette nouvelle interprétation serait valable non seulement pour la France, mais pour une ceinture comprenant notamment les Etats-Unis et l'Europe moyenne. En d'autres termes, la géochimie du sol autour des gîtes serait, pour ces régions, beaucoup plus sous la dépendance de *paléoclimats*, qu'influencée par le climat actuel.

En zone tropicale (\*), l'interprétation minutieuse des données géochimiques récoltées dans le cadre de l'Inventaire de la Guyane a, de son côté, permis d'obtenir une information précieuse sur le comportement des éléments majeurs et traces au cours de l'altération ferrallitique.

Il était en effet important de discriminer, dans le milieu géochimique superficiel, l'influence des concentrations liées au cycle supergène de celles directement héritées de la roche mère.

L'approche retenue a consisté à comparer, par diverses méthodes statistiques, les teneurs des éléments traces aux teneurs en  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$ , qui ont été considérées comme les deux principaux paramètres contrôlant l'intensité de l'altération ferrallitique.

Les résultats de cette étude ont permis de regrouper les éléments étudiés en trois catégories, en fonction de leur comportement respectif dans les milieux altérés. (Ce classement n'est valable que pour un environnement silico-alumineux plutonique ou sédimentaire, et les résultats obtenus ne peuvent en aucun cas être extrapolés au milieu carbonaté).

. Les éléments ayant subi un enrichissement lors de l'altération ferrallitique : Ti, Cr, V, P, Zr essentiellement.

. Les éléments partiellement lessivés sous des conditions d'altération intense ( $Fe_2O_3 + Al_2O_3 > 60\%$ ) : Cu, Ni, Zn, Mn. Ce lessivage n'affecte en général, dans le contexte de la zone guyanaise, qu'une faible fraction de l'échantillonnage (10 à 15 %).

. Les éléments pour lesquels aucune tendance systématique n'a pu être dégagée : Pb, Mo, Ba, B, As, Sn...

Les différents résultats obtenus grâce à une bonne adaptation de l'outil analytique (dosage traces et estimation des majeurs), confirment la validité des réponses géochimiques dans une zone tropicale peu affectée par les phénomènes de

---

(\*) Zegers H., 1978, Regional geochemical prospecting in equatorial areas : an example in French Guyana. 7<sup>th</sup> Int. Geoch. Exploration Symposium, Golden, Colorado, avril 1978 (à paraître).

cuirassement : ils demandent néanmoins à être précisés pour les environnements particuliers que sont les minéralisations sulfurées. Les recherches méthodologiques sont en cours à ce propos.

#### Au niveau de la prospection tactique

L'application de l'analyse multi-éléments aux échantillonnages tactiques (prélèvements de sols) a en premier lieu permis de préciser les associations d'éléments pouvant refléter, dans les zones d'altération, la proximité d'une minéralisation sous-jacente (Pb-As, Cu-Ag, Cu-P, Sb-As, ...). L'identification de telles associations au moyen des méthodes factorielles par exemple, a facilité ultérieurement la sélection des anomalies régionales d'origine sulfurée. Cependant, ce type de recherche a principalement été réalisé à titre méthodologique, les contrôles tactiques étant limités le plus souvent, au stade opérationnel, à l'analyse de 1 à 2 éléments.

Signalons, dans un autre ordre d'idée, que les résultats tactiques obtenus à partir d'une maille d'échantillonnage régulière, se prêtent plus aisément à la mise en œuvre des méthodes de traitement par analyse fréquentielle, dont les applications aux données géochimiques sont en cours d'étude.

#### 2.2. Les apports liés à une meilleure définition des cycles géochimiques supergènes

S'il paraissait urgent, à la suite du développement des techniques d'analyse spectrale, d'adapter l'outil de traitement à la multiplicité des données géochimiques, il ne fallait cependant pas perdre de vue que peu de changements avaient été apportés, depuis une quinzaine d'années, aux modes d'échantillonnages réalisés et à la nature des matériaux prélevés. Ceci paraissait directement imputable à la faible évolution de nos connaissances des cycles géochimiques dans le domaine superficiel.

En effet, le développement de la prospection géochimique appliquée à la recherche minière a été plus rapide que celui de nos connaissances de base sur les mécanismes de dispersion des métaux dans les zones d'altération superficielle des minéralisations, conduisant à un certain empirisme dans l'application de ces méthodes.

Ainsi, la mise en œuvre de l'outil géochimique reste encore largement régie à ce jour par des critères d'analogie, dégagés et affinés par l'expérience acquise au fil des années, sans que soit précisé pour autant comment migre tel ou tel métal dans l'environnement géochimique particulier d'une minéralisation.

Or, seul un renouvellement de nos connaissances sur le cycle supergène des métaux prospectés semble être en mesure d'apporter des améliorations, en termes d'efficacité et de rendement, aux techniques de prospection géochimique actuellement opérationnelles, et de mieux définir en particulier, les types de matériaux à échantillonner et à analyser.

Tel fut l'objet principal de l'étude de "l'optimisation des méthodes de prospection géochimiques régionales", réalisée en commun par les équipes de géo-



chimistes de la S.N.E.A. (P) et du B.R.G.M. dans le cadre d'une Action concertée D.G.R.S.T. (\*).

Au cours de cette étude, nous nous sommes attachés à étudier le "devenir" des métaux dans la zone d'altération de *six prospectifs minéralisés de France*, afin de préciser en particulier la localisation des métaux dans les différents matériaux les plus couramment échantillonnés en prospection : roches, roches altérées, sols, sédiments de ruisseau, concentrés alluvionnaires, eaux de surfaces, et de mettre en évidence leurs phases-support privilégiées.

En d'autres termes, cela revient à étudier :

- . comment est exprimé, par exemple, le cuivre dans un sol à 200 ppm ?
- . est-il réparti d'une manière homogène ou concentré dans une ou plusieurs phases particulières ?
- . dans ce cas, n'y a-t-il pas moyen d'isoler une phase "porteuse" et de l'analyser préférentiellement à l'échantillon tout-venant beaucoup plus dilué ?

Cela devrait permettre d'obtenir des niveaux d'anomalies mieux marqués et, le cas échéant, d'augmenter les contrastes géochimiques (rapport anomalie/fond) et les distances de dispersion. Ce sont justement ces paramètres qui conditionnent la densité maximale d'échantillonnage nécessaire pour "accrocher" des minéralisations de taille économique. Or, qui dit relâchement de la maille de prélèvement, dit moindre prix de revient de la prospection et nous retrouvons ici le véritable sens et objectif du terme "optimisation".

Les travaux réalisés se sont appuyés sur un échantillonnage important : 270 roches altérées, 240 roches altérées meubles, 730 sols, 240 sédiments de ruisseaux, 130 concentrés de barées et 140 eaux de surface. L'analyse multi-éléments effectuée tant sur les échantillons tout-venant que sur diverses fractions granulométriques, densimétriques et magnétiques, les extractions chimiques sélectives et les contrôles minéralogiques par microscopie optique, rayons X et microsonde électronique ont permis de préciser les principales phases support des métaux dans les matériaux de surface échantillonnés. Ces phases, sont, par ordre d'importance décroissante :

- . les hydroxydes de fer et manganèse, qui renferment en moyenne plus de 50 % du stock métal des échantillons prélevés en zone anormale ;
- . divers minéraux hypogènes ou supergènes ;
- . la matière organique associée au fer.

Dans l'environnement immédiat des différents gîtes étudiés, c'est la phase "hydroxydes de fer" (dont l'abondance dépend de la quantité de sulfures dans la

---

\* (\*) Wilhelm E., Leville-Timsit L., Lisle M., Sarcis C., Cachau-Herréilat F., Capdecombe H., Larribau E., 1977, Optimisation des méthodes de prospection géochimiques régionales Rapport D.G.R.S.T. synthèse, huit annexes, 794 p ; diffusion interne B.R.G.M. 77 SGN 140 GMX ; S.N.E.A. (P) GEO/LAB Pau 75/77 RM).

minéralisation et des conditions physico-chimiques du milieu), formée en roches puis dispersée mécaniquement, qui est prépondérante dans la définition des anomalies géochimiques.

Pour nos climats tempérés, l'importance de la dispersion détritique, caractéristique d'anciens climats périglaciaires, permet ainsi d'envisager une amélioration des techniques de prospection géochimiques, en particulier au niveau de la préparation des échantillons. En effet, par comparaison avec l'analyse de l'échantillon tout-venant tamisé à 125 ("stream" habituel), l'analyse de la fraction "hydroxyde" para-magnétique, préalablement sélectionnée par voie physique ou chimique, augmente d'une manière significative les teneurs (facteurs 1 à 4) et le contraste des anomalies (facteurs 1 à 3), mais plus faiblement leurs dimensions.

Un exemple d'une telle "optimisation" appliquée au prospect à Cu-Mo des Deillets (Vosges) est présenté figures 4 et 5 (global : stream habituel ; attirable : fraction "hydroxyde").

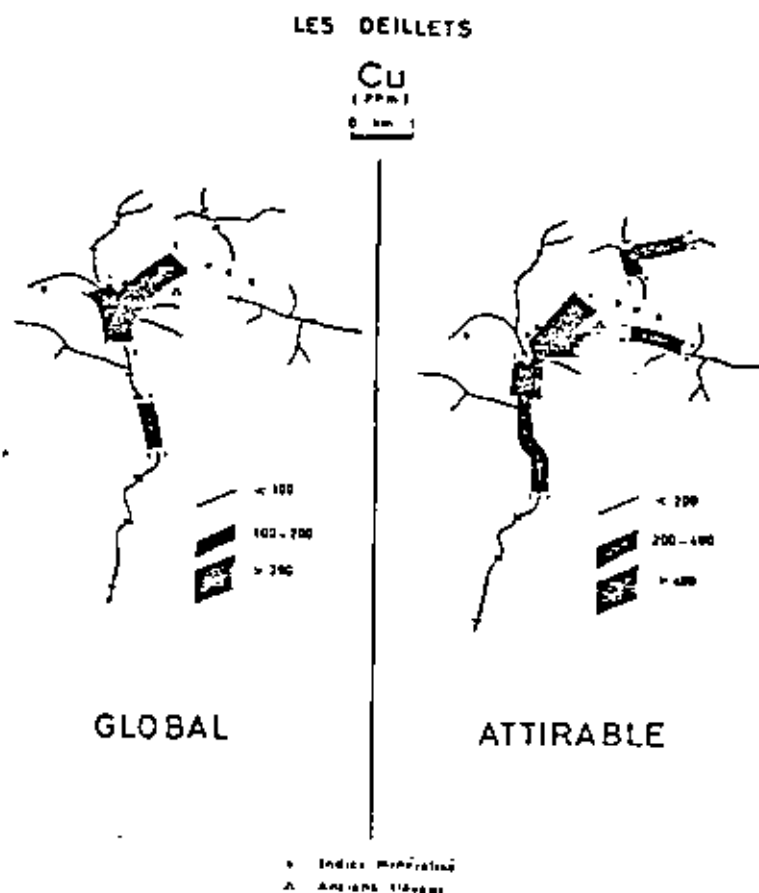
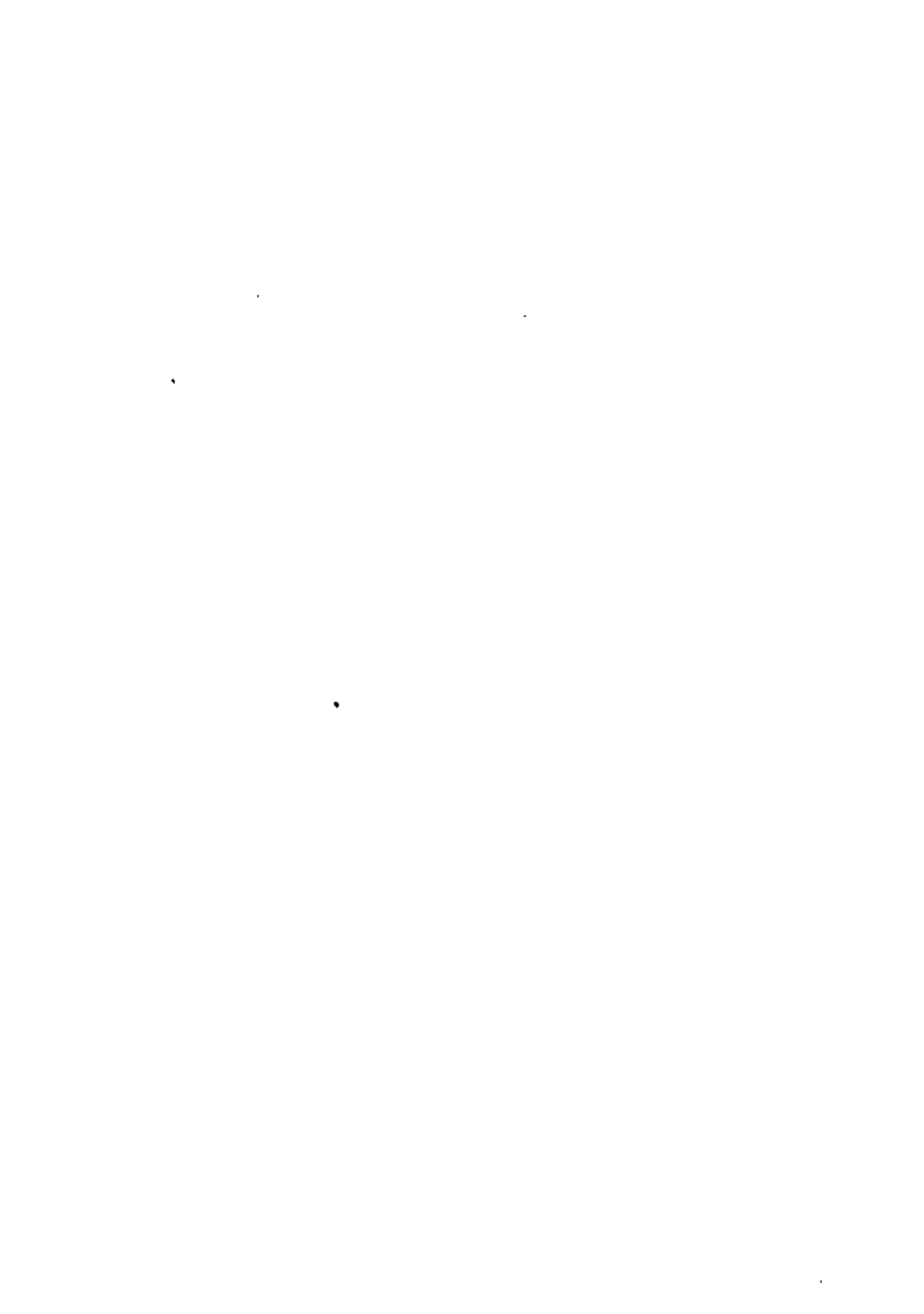


Figure 4



## LES OEILLETS

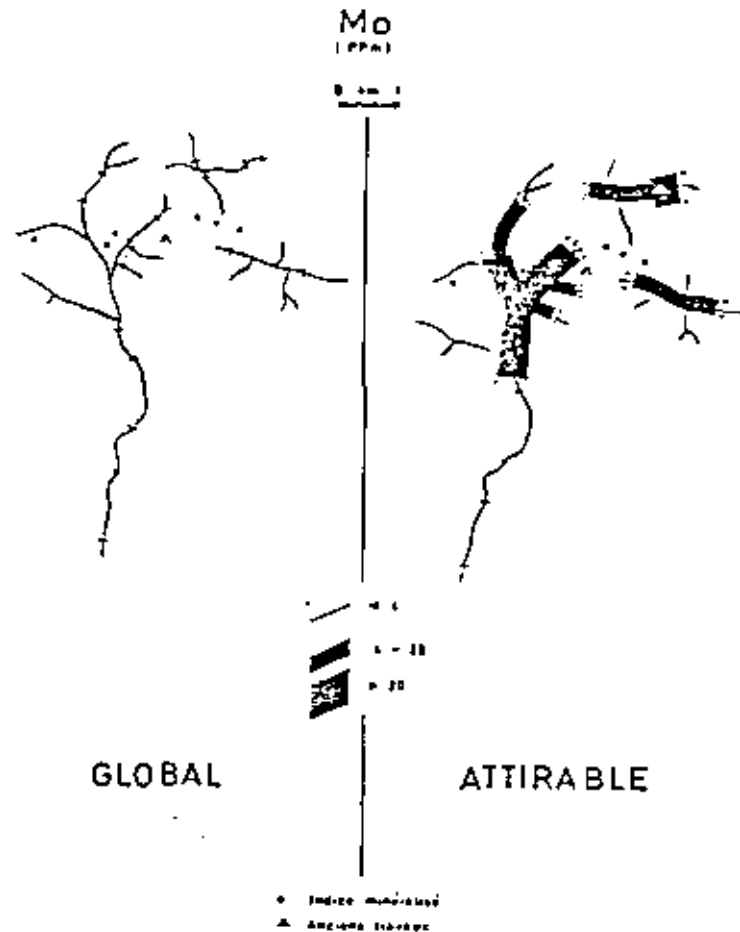


Figure 5

Ainsi, par une meilleure définition et sélection des anomalies, cette technique peut conduire à un relâchement de la maille d'échantillonnage; l'amélioration obtenue doit cependant être mise en parallèle avec l'augmentation corrélative des coûts unitaires des séparations de phases ou des analyses chimiques sélectives d'une part, la perte d'information liée à l'analyse d'une seule phase sélectionnée d'autre part.

Les recherches se poursuivent actuellement au S.R.G.M. sur les possibilités et les champs d'application de cette technique à l'échelle opérationnelle, soit au stade de la reconnaissance, soit lors d'une phase "intercalaire" pour contrôler les anomalies faibles ou ponctuelles.



### 3. PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES TECHNIQUES DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

Indispensable pour la recherche des minéralisations masquées par les horizons superficiels, le prélèvement et l'analyse géochimique des sédiments et des sols continuera d'être pour le géologue minier un outil de prospection privilégié, ainsi l'effort méthodologique destiné à optimiser les différentes phases de la prospection devra être poursuivi afin d'affiner au mieux l'efficacité et le rendement de cette technique. Le développement de ces méthodes directes de recherche ne devront cependant pas nous faire négliger celui d'autres techniques d'approche géochimique, en cours d'expérimentation, et mieux adaptées à la prospection des gîtes cachés plus profonds :

Mentionnons plus particulièrement à ce propos la géochimie en roche (roche totale et minéraux) appliquée à la prospection minière :

- définition des halos de dispersion géochimique,
- définition des potentialités métallogéniques d'unités pétrologiques ou lithologiques . . . Ce thème prend à l'heure actuelle une importance croissante dans l'effort de recherche consenti pour la mise au point de nouveaux guides de prospection.

S'inscrit également dans cette optique l'application de l'hydrogéochimie à la prospection minière ; cette méthode est, à l'exception du dosage du fluor dans les eaux, peu développée à l'heure actuelle ; elle fait par contre l'objet de recherche à caractère plus fondamental, indispensable pour une bonne compréhension des états d'équilibres entre solutions et minéraux.

# Histoire de la découverte des gisements Pb-Zn-Cu-Ag armoricains Méthodologie de la prospection

par J. GUIGUES\*

**Mots clés :** *Historique. Prospection géochimique. Gîte caché. Gîte stratiforme. Gîte volcanogène. Cu, Pb, Zn, Shale, Siltstone, Tuffite, Dévonien inf., Echantillonnage, Chapeau de fer, Polarisation spontanée, Méthode d'induction, Massif Armoricain.*

## Résumé

Dans le passé, le sous-sol du Massif Armoricain a produit du minerai de plomb argentifère extrait de grands lîlons subméridiens, d'âge tardi-hercynien, mais jamais de minerai de cuivre.

Les nouvelles minéralisations stratiformes Cu-Pb-Zn-Ag ont été découvertes à la suite d'une prospection géochimique régionale systématique pour Pb-Zn, couvrant le synclinorium paléozoïque du centre de la Bretagne. Une vaste anomalie était apparue à Bodennec sur la bordure de laquelle fut effectuée en 1968 une petite recherche souterraine. Les galeries montrèrent pour la première fois en Bretagne des indices Cu-Zn-Pb appartenant au type volcano-sédimentaire, dans une série de shales noirs, pelites et tuffites d'âge dévonien inférieur. Après réalisation d'une nouvelle géochimie stratégique pour Cu-Ag et d'une

campagne géophysique P.S., des concentrations sulfurées de caractéristiques économiques furent traversées en 1971-73 dans les sondages percutants d'exploration.

Le gisement de la *Porte-aux-Maines* fut découvert de la même façon en 1975 dans des formations volcano-sédimentaires ayant le même âge que celles de Bodennec et invisibles en surface en raison de la couverture végétale.

La méthode qui est actuellement utilisée pour découvrir d'autres indices de minéralisation comporte les étapes suivantes : 1) prospection géochimique stratégique Pb-Zn-Cu-Ag, échantillonnage des chapeaux de fer ; 2) prospection géochimique tactique Pb-Cu-Ag, prospection géophysique PS et VLF, sondages percutants de 50 m (wagon-drill).

## Abstract

In the past the Armorican Massif has produced lead ore with minor silver mined from big NS veins of late Hercynian age, but it has never produced copper.

The new Cu-Pb-Zn-Ag stratiform mineralizations were discovered as the result of a systematic regional geochemical prospecting for Pb and Zn, covering the Paleozoic synclinorium of the central Brittany. At Bodennec a little underground exploration was carried out in 1968 on the edge of a wide geochemical anomaly. Underground workings showed the first occurrence from Brittany of some Cu and Zn of volcano-sedimentary type in a series of black shales, pelites and tuffites of Lower Devonian age. In 1971-1973, after a new geochemical prospecting for Cu

and Ag and a S.P. geophysical survey, percussion drilling cut some economic sulfides mineralization.

The *Porte-aux-Maines* blind deposit, located in volcano-sedimentary formations of the same age as those of Bodennec, was discovered in 1975 by the same prospecting as at Bodennec.

Prospecting methods used at the present time for searching new mineralizations consist of: 1) strategical geochemical prospecting for Pb, Zn, Cu and Ag and sampling of gossans; 2) tactical geochemical prospecting for Pb, Cu and Ag, SP and VLF geophysical surveys, 50 m deep percussion drilling (wagon-drill).

\*BRGM, Division Vendée Bretagne





## Resumen

En el pasado, el subsuelo del Macizo Armoricano ha producido mineral de plomo argentífero sacado de grandes filones sumeridianos de edad hercyniana, pero nunca mineral de cobre.

Las nuevas mineralizaciones estratiformes Cu-Pb-Zn-Ag se descubrieron después de una prospección geoquímica regional sistemática para Pb-Zn, que cubrió el sincrónico paleozoico del centro de Bretaña. En Bodennec había aparecido una anomalía muy grande en cuyo borde se procedió a una pequeña exploración subterránea en el año 1968. Por primera vez en Bretaña se pudieron ver en las galerías unos indicios Cu-Zn-Pb perteneciendo al tipo volcánico-sedimentario, en una serie de shales negros pelitas y tobetas de edad devónica inferior. Después de realizarse una nueva geoquímica estratégica para Cu-Ag y una

campaña geofísica P.S., se atravesaron unas concentraciones sulfuradas en los años 1971-1973 en los sondeos percutientes de exploración.

El yacimiento de la Porte-aux-Moines se descubrió de la misma manera en 1975 en unas formaciones volcánico-sedimentarias de la misma edad que las de Bodennec e invisibles en superficie debido a la capa vegetal.

El método que actualmente se utiliza para descubrir otros indicios de mineralización comprende las siguientes fases: 1) prospección geoquímica estratégica Pb-Zn-Cu-Ag, muestreo de las pezoneras de hierro; 2) prospección geoquímica táctica Pb-Cu-Ag, prospección geofísica P.S. y V.L.F., sondeos percutientes de 50 m (wagon-drill).

Jusqu'aux récentes découvertes du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, le sous sol du Massif Armorican était considéré comme particulièrement pauvre en minerai de cuivre. Le petit nombre d'indices signalés (F. KERFOUR, 1926) n'étaient en fait que des curiosités minéralogiques et, aussi loin que l'on pouvait remonter dans les archives, on ne trouvait aucune mention d'activité minière pour le cuivre en Armorique. Aucun vestige d'exploitation n'a d'ailleurs été retrouvé au cours des prospections systématiques des deux derniers décennies.

Cela fut donc une réelle surprise lorsque le B.R.G.M. découvrit en 1966 près de Lanmeur (Finistère) des filons à cassitérite contenant une paragenèse sulfurée cuprifère avec une teneur de 0,5 % Cu. Quelques années plus tard, le B.R.G.M. fit une découverte encore plus étonnante, celle des minéralisations sulfurées stratiformes à Cu-Zn-Pb-Ag dans le Paléozoïque de la région de Bodennec, correspondant à un type de gîte tout à fait nouveau pour la Bretagne qui ne rentrait pas dans la typologie classique des gîtes plombo-zincifères armoricains.

### I - La prospección del plomo-zinc avant la découverte de Bodennec : le modèle filonien

Le Massif Armorican n'a jamais été une grande région productrice de minerais de plomb-zinc-argent. Cependant quelques exploitations y ont été actives, surtout au 19<sup>e</sup> siècle. Comme le montre la carte de la figure 1, seules trois d'entre elles, situées dans la partie centrale de la Bretagne, ont eu quelque importance : Pontpéan, Huelgoat et Poullaouen. Ces gisements depuis longtemps abandonnés ainsi que d'autres de moindre importance ont tous été décrits comme des remplissages filoniens de direction submérienne et de pendage subvertical, d'âge tardihercynien, montrant une répartition de la minéralisation en colonnes.

C'est donc un modèle filonien classique qui a été choisi pour orienter la première prospección géochimique régionale pour plomb et zinc effectuée par le B.R.G.M. durant la période 1958-63. Cette prospección organisée par

W. SAKOWITSCH en liaison avec la Division Minière du B.R.G.M., réalisée sur le terrain par A. BRAS avec le concours de J. COUPEL pour les analyses à la diatone a été un modèle du genre, donnant des résultats tout à fait remarquables dont l'exploitation n'est pas encore terminée actuellement. Comme l'a écrit W. SAKOWITSCH (1963), il a été réalisé en Bretagne centrale, région présumée favorable, une couverture géochimique Pb-Zn de 4 000 km<sup>2</sup>, comportant 80 000 échantillons de sols le long du réseau hydrographique (stratégique), 40 000 échantillons de sols en quadrillage de contrôle d'anomalies (tactique). Parmi les 200 anomalies découvertes en stratégie, celle de Piélauff devait conduire à la mise en évidence d'un filon plombo-zincifère bien minéralisé, correspondant au modèle recherché, mais qui avait été écrémé en partie haute par une exploitation du Moyen Âge totalement inconnue et indiscernable en surface.

élevée, fut poursuivie inlassablement jusqu'à la découverte des premiers indices stratiformes polymétalliques. L'histoire de cette découverte est relatée ci-après.

Entre-temps, les idées sur la métallogénie armoricaine dont un premier point avait été fait par A. CHAURIS et J. GUIGUES en 1968 (Mémoire du B.R.G.M. n° 74, 1968), évoluaient lentement en même temps que progressaient toutes les connaissances géologiques. Se basant sur l'analogie du Massif Armoricain et de l'Espagne déjà soulignée par divers chercheurs de l'Université, J. AGARD était l'instigateur en avril et novembre 1968 d'une excursion

métallogénique sur les formations volcaniques paléozoïques de Bretagne et d'Anjou, en vue de définir des guides pour la recherche des minéralisations sulfurées Pb-Zn-Cu. Les conclusions résumées par J. BOULADON (1968) invitaient à examiner le volcanisme caradocien de la presqu'île de Crozon ainsi que la série splitique et kôratophyrique de Saint-Georges-sur-Loire. Ces conseils furent provisoirement délaissés, toute l'attention et tous les efforts se portant sur les minéralisations de Bodennec qui venaient juste d'être trouvées, puis sur celles de la Porte-aux-Moines, situées dans des séries d'âge dévonien inférieur, en relation avec un volcanisme quasi inconnu.

## II - Histoire de la découverte des gisements de Bodennec et de la Porte-aux-Moines

Les gisements de Bodennec (Finistère) et de la Porte-aux-Moines (Côtes-du-Nord) sont situés dans des régions où aucun indice de minéralisation Pb-Zn-Cu n'était connu. C'est la campagne de *prospection de reconnaissance géochimique systématique* pour Pb et Zn, couvrant la plus grande partie du synclinorium paléozoïque médian armoricain, qui est à l'origine de la découverte des premiers indices (A. BRAS et W. SAKOWITZ, 1960, 1961, 1963, 1970).

### Bodennec

Une vaste anomalie géochimique tactique Pb-Zn, inscrite dans un rectangle de 1 200 x 300 m allongé dans la direction EW, avait été obtenue aux sources de l'Auline, dans un vallon marécageux. Les teneurs en plomb y montraient des maxima de 200 à 1 000 ppm pour un fond de 20 ppm. D'après la carte géologique, le substratum était formé de roches de la série des schistes et quartzites de Plougastel d'âge Gédinnien inférieur, non loin de son contact avec un complexe d'amphibolites et dolérites rapportées au Briovérien.

Les premiers travaux de décapage (tranchées) difficiles à exécuter en raison de l'altération argileuse intense du substratum ne permirent pas de dégager des minéralisations en place ni même de faire des observations pétrographiques. Des essais de géophysique (résistivité) ne furent pas plus déterminants. Une zone argileuse noire à forte teneur en Pb, observée dans une tranchée en bordure SE de l'anomalie, fut sélectionnée pour une reconnaissance en profondeur. Deux sondages carottés courts (58 et 90 m) traversèrent des schistes et quartzites alternés très pyriteux ainsi que de petits passages quartziteux minéralisés en Pb-Zn-Cu-Ag.

En mars 1968 fut ouverte une *recherche souterraine par puits* à proximité des sondages précédents, dans le secteur dit de Corn-Ar-Hars. Elle se termina en janvier 1969 après la réalisation de 320 mètres de traçages au niveau - 40 m. Dans ces travaux fut découverte pour la première fois en Bretagne une *minéralisation stratiforme Pb-Zn* au sein de schistes sombres sériciteux et pyriteux très plissés et de

schistes à lentilles blancs, ainsi qu'une *petite lentille à blendé, chalcoppyrite, sulfantimoniures et pyrrotine* localisée le long d'une zone de broyage. Des corps intrusifs de roche volcanique blanche kaolinisée avaient été également traversés rendant difficiles la progression des galeries. Ces deux minéralisations étaient *nettement infraéconomiques*. La deuxième suggérait cependant l'existence d'un type *volcano-sédimentaire* inconnu jusqu'alors, peut-être susceptible d'extension et intéressant à prospecter (J. BOULADON, 1968).

Les travaux des années 1969 et 1970 comportèrent de nouveaux essais géophysiques (Turam et polarisation provoquée) sur les environs de la recherche souterraine de Corn-Ar-Hars ainsi qu'une reprise des échantillons de la prospection stratégique régionale en vue de dosages multiéléments en S.O.E. dont Cu et Ag, en utilisant le traitement statistique en ordinateur. Cette dernière étude a confirmé l'existence d'une anomalie Pb-Cu à Bodennec, surtout dans la partie occidentale de l'anomalie plomb initiale ainsi qu'au-delà vers l'Ouest, et révélé en outre quelques fortes valeurs ponctuelles en Ag-Cu (J. BARBIER et E. WILHELM, 1971).

En 1971, les nouvelles données acquises se limitaient donc à la présence de teneurs en cuivre en alluvion à l'Ouest de l'ancienne recherche souterraine ainsi qu'à la probabilité d'existence de minéralisations stratiformes dans un encasement non identifiable en surface. Ces informations ne permettaient pas de localiser des points précis d'attaque pour des sondages carottés. *C'est parce que l'équipe de la Division Minière du B.R.G.M. n'avait pas perdu la foi dans le succès d'une part, et qu'un procédé de sondage percutant bon marché pouvait être utilisé pratiquement à discrétion d'autre part, que la recherche a pu progresser en prenant cette fois le virage décisif.*

Au cours du 3<sup>e</sup> trimestre 1971 furent implantés les premiers profils de sondages percutants (wagon-drill), disposés en travers de chacun des principaux pôles Pb de l'anomalie tactique initiale faite à la maille de 50 x 50 m en sols. Au total 7 profils de sondages verticaux de 30 mètres, avec une équidistance entre sondages de 20 ou 25 m, ont

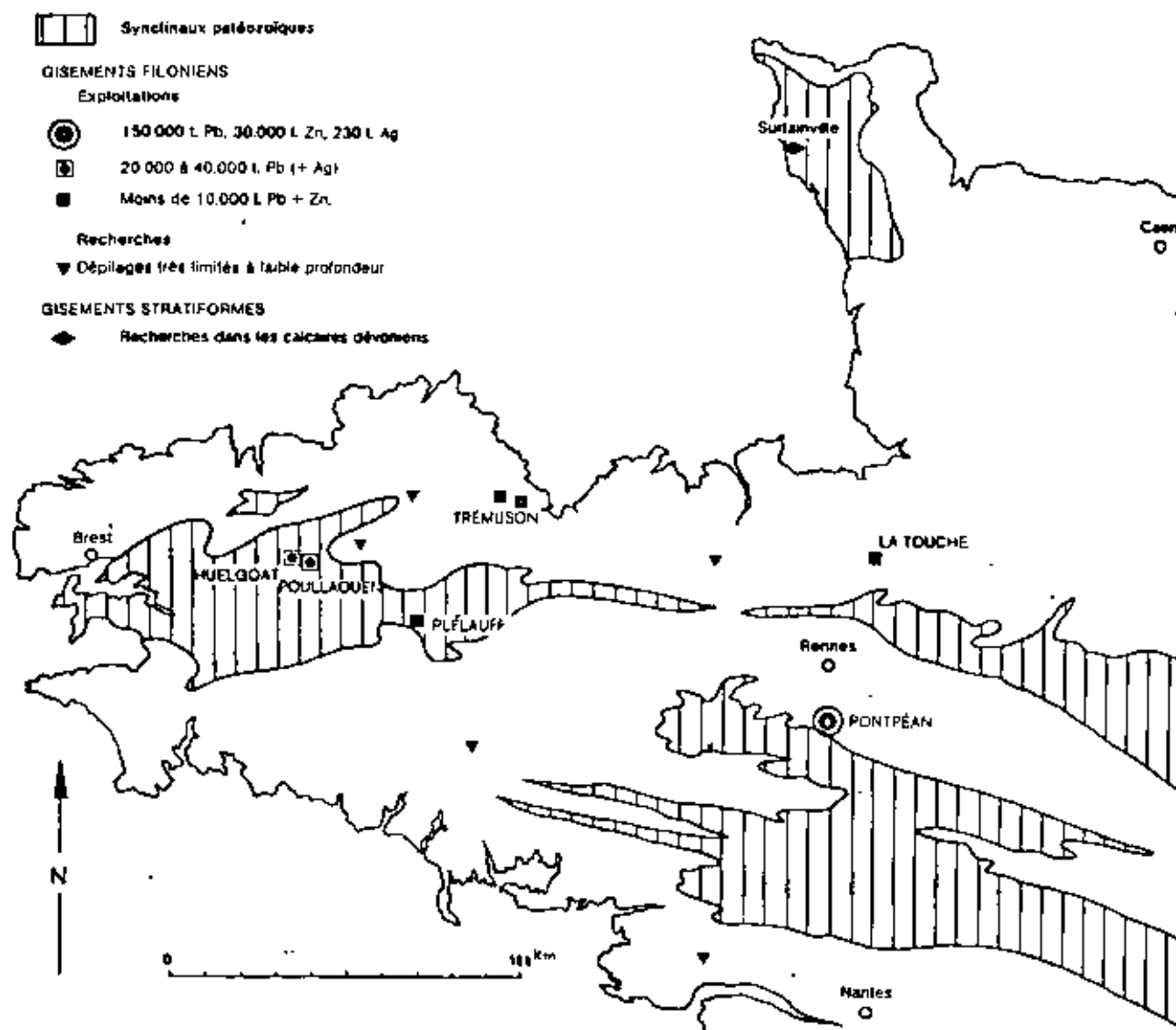


Fig 1 - Anciennes mines de plomb-zinc-argent du Massif armoricain.

Durant cette période antérieure à 1964 les anomalies géochimiques étaient traitées en priorité lorsqu'elles avaient un allongement méridien, parce que cette direction était celle du modèle cherché. En outre de telles anomalies étaient fréquemment d'un niveau élevé en raison de l'existence de très vieilles recherches ayant pollué le réseau hydrographique et sur lesquelles on ne disposait d'aucun renseignement, si bien que l'on était tenté de procéder à des travaux détaillés pour préciser les caractéristiques des indices.

Il est intéressant de noter que les gisements Pb-Zn-Cu stratiformes en schistes noirs pyriteux, dont il sera question

plus loin, disposés dans des creux topographiques ou sur des pentes couvertes d'éboulis quartzitiques ont donné des anomalies Pb-Zn dans toutes les zones où la prospection stratégique de W. SAKOWITSCZ et A. BIRAS avait pu être effectuée. Mais la complexité de forme des anomalies obtenues, leur intensité souvent basse et les résultats difficilement interprétables des mesures géophysiques au sol ont conduit à différer l'étude détaillée d'un grand nombre d'anomalies que l'on jugeait ne pas pouvoir correspondre à des filons armoricains classiques.

Pourtant, l'étude d'une des anomalies (de A. BIRAS, celle de Bodennec, qui était particulièrement étendue et de valeur



Photo n° 1 : Vue générale du vallon du Roudou Velget, en amont du gisement de Bodennec. Cette zone de lande marécageuse correspond à l'emplacement de la vaste anomalie géochimique Pb Zn qui a été à l'origine des recherches. A droite, on aperçoit les réblais de la recherche souterraine du B R G M, dite de Corn Ar Hars, réalisée en 1968. A l'horizon, le village de Creach Pluen.



Photo n° 2 : La vallée du Roudou Velget immédiatement au Sud de la route de Callac à Morlaix, là où elle traverse le gisement de Bodennec, photographiée avant les travaux miniers de 1976-1977. Au premier plan, dans le pré, les couches sulfurées à Pb Zn Cu sont très près de la surface à quelques mètres de profondeur, formant une charnière synclinale. Aucune trace de chapeau de fer n'est visible. A l'horizon, la ferme de Bokdenec. Vers la droite, dans la vallée, se trouve l'emplacement de la descendrière qui sera ouverte au début de 1976.

été réalisés. Les « cuttings » ont été analysés par passes de 4,80 m pour Pb-Zn-Cu-Sb. Les résultats permettaient de conclure à l'existence d'une minéralisation diffuse à Pb-Zn-Cu, avec localement des concentrations de 1,75 à 3,6 % métal, avec un maximum de 0,9 % Cu.

Dès lors, les recherches ont été accélérées, comportant en 1972 les opérations suivantes : campagne complémentaire de sondages wagon-drill, essais de prospection géophysique électromagnétique (Melos), polarisation provoquée, magnétisme et polarisation spontanée. Dans les sondages percutants, de nouvelles traversées minéralisées ont été obtenues titrant près de 1 % Cu et 1 à 3 % Pb + Zn, semblant s'aligner dans le sens EW au fond de la vallée. En géophysique, une très belle anomalie PS en forme de tréfle a été mise en évidence, présentant des pôles négatifs de 400 mv à l'Ouest et à l'Est du pont du Roudou-Velgnt (R. CLUSEAU et al. 1972).

Ces résultats ont conduit en 1973 à étendre la prospection géochimique tactique vers l'Ouest et à réaliser en fin d'année de nouvelles lignes de sondages wagon-drill verticaux poussés jusqu'à la profondeur de 50 mètres. Les lignes disposées en travers du lobe occidental de l'anomalie PS ont touché des minéralisations sulfurées de caractéristiques économiques, s'alignant sur 300 mètres en direction, semblant correspondre à des couches d'allure stratiforme. Il ne faisait aucun doute que ces impacts minéralisés proches de la surface correspondaient à la partie haute d'un gisement sulfuré Pb-Zn-Cu-Ag qu'il importait maintenant de reconnaître.

Les premiers sondages carottés d'exploration ont été effectués de février à mai 1974, puis à partir de septembre jusqu'à la fin de 1975, en même temps que se déroulaient des études géologiques et géophysiques. Cette phase de reconnaissance du gisement est exposée dans un autre article du présent numéro de la *Chronique*.

#### Porte-aux-Moines

Initialement, une anomalie géochimique Pb-Zn avait été découverte sur le versant méridional de la Butte Saint-Michel près de la Porte-aux-Moines. Les prélèvements de sols à la maille 50 × 50 m donnaient à l'analyse des valeurs anormales pour le plomb comprises entre 60 et 860 ppm, s'inscrivant dans un rectangle de 800 × 500 m, allongé suivant un axe SSO-NNE.

L'étude de cette anomalie fut commencée après la découverte du terrain volcano-sédimentaire gédinnien de Bodennec qui pouvait être rapproché des formations volcaniques de la Butte Saint-Michel. J. SAGON (1966) avait décrit, en effet, sur cette butte un volcanisme acide d'âge gédinnien, précédant une phase de plissement pré-dinantienne (phase bretonne).

Des compléments d'étude géochimique ont d'abord été réalisés : extension du quadrillage de prélèvements en sols à

la maille 50 × 50 m, profils de prélèvements à la tarière suivant une maille de 100 × 10 m. Enfin en octobre 1974, les échantillons de la campagne stratégique ont été dosés en S.O.E. pour 29 éléments. Deux prélèvements situés au Sud de la Butte Saint-Michel indiquaient une anomalie Pb-Zn-Cu-Ag (J. BARBIL, 1970).

En octobre 1975 les premières lignes de sondage wagon-drill furent exécutées, réparties en travers de l'anomalie Pb, à des distances de 100, 200 et 300 m, l'espacement des sondages étant de 25 m. Au total, la campagne représentait 4 265 mètres de sondages verticaux et inclinés. Les analyses Pb-Zn-Cu-Ag effectuées sur les cuttings par passes de 2,40 m ont révélé des traces de minéralisations dispersées, sauf dans un seul sondage foré verticalement sur le flanc sud de la Butte Saint-Michel (ligne 4, sondage S 7), où les teneurs atteignaient 22 % Pb + Zn + Cu entre 16 et 28 mètres de profondeur.

Ce sondage particulièrement heureux fut contrôlé par 3 autres sondages percutants inclinés, placés à 22 mètres du premier et convergents vers le corps sulfuré, de manière à déterminer sa direction et son pendage. Il en résulta que l'orientation la plus probable de la minéralisation était WNW-ESE, avec un pendage vers le Sud assez fort.

Avant même que soient commencées des études géophysiques sur ce bal indice, un sondage carotté de contrôle fut implanté à la fin de janvier 1976. Long de 190 mètres et incliné de 55 grades vers le Nord, ce forage PAM 1 rencontra plusieurs formations sulfurées minéralisées dans un encaissant de shales noirs inconnus à l'aflurement. Deux traversées de caractéristiques économiques, distantes de 13 mètres, ont pu être délimitées. L'une de 17,65 mètres à 8,1 % Zn + Pb, 0,12 % Cu et 79 g/t Ag, l'autre de 11,55 m à 7 % Zn + Pb et 75 g/t Ag.

L'intérêt de la prospection géophysique P.S. avait été prouvé précédemment à Bodennec. Une campagne de P.S. fut donc entreprise en février 1976 sur la Butte Saint-Michel et bien au-delà au Nord vers le Rohel, puis à l'Ouest et à l'Est de la Porte-aux-Moines. Une remarquable anomalie négative, avec un pôle de 300 mv, apparut à l'aplomb de la minéralisation du sondage PAM 1, donnant un allongement de 300 mètres environ dans la direction WNW-ESE.

D'autres contrôles géophysiques furent faits en 1976 notamment des tests EM-VLF, magnétisme, et des mises à la masse dans le sondage PAM 1. Les résultats les plus intéressants furent la mise en évidence d'une anomalie positive VLF se superposant à l'anomalie PS, ainsi que la probabilité d'extension de la minéralisation vers l'Est d'après les mises à la masse.

Le gisement de la Porte-aux-Moines était donc bien localisé dès l'été 1976. Il restait à le reconnaître par une campagne de sondages carottés. Celle-ci fut commencée au deuxième semestre de la même année. Les différents travaux et études qui ont accompagné cette exploration sont décrits dans une autre note de ce numéro de la *Chronique*.



Photo n° 3 : Butte St-Michel, près de la Porte-aux-Monies, vue du Sud. Le champ labouré au premier plan est situé dans l'anomalie géochimique Pb-Zn-Cu en aval pente du gisement. Cela-ci a été localisé à la hauteur des arbustes et des haies en dessous de la zone boisée entourant le sommet.

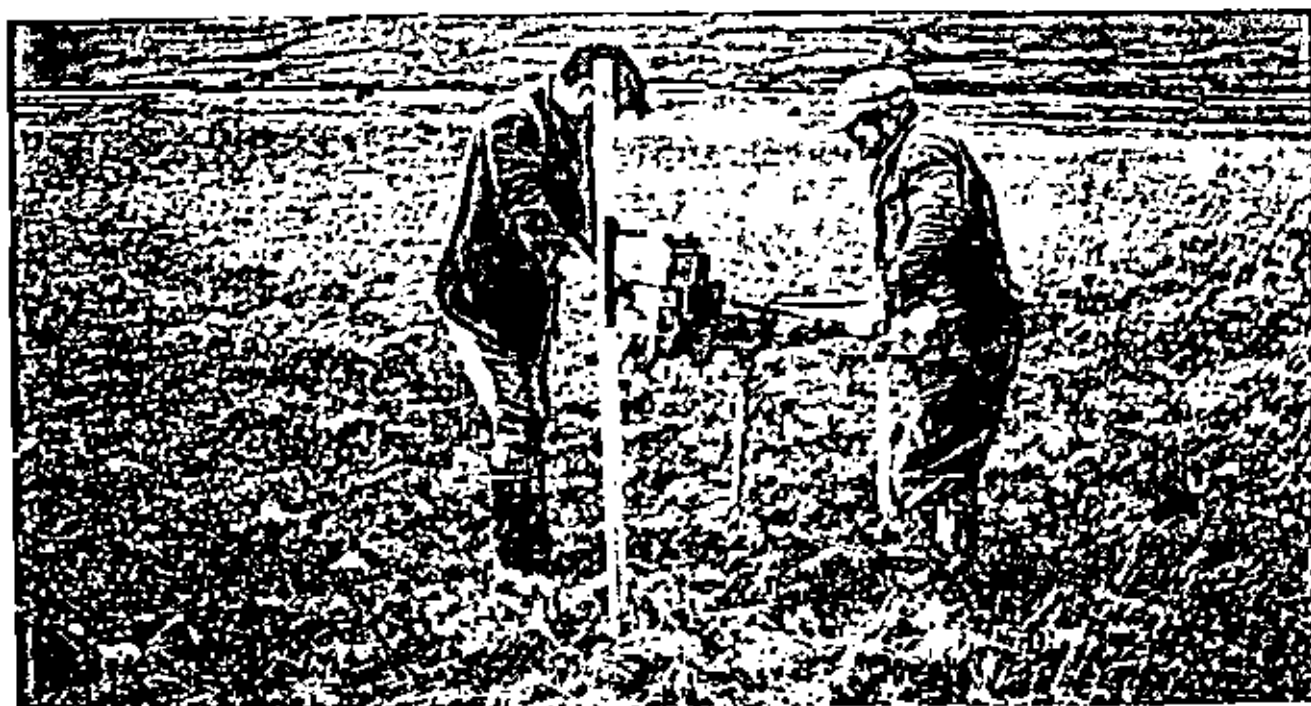
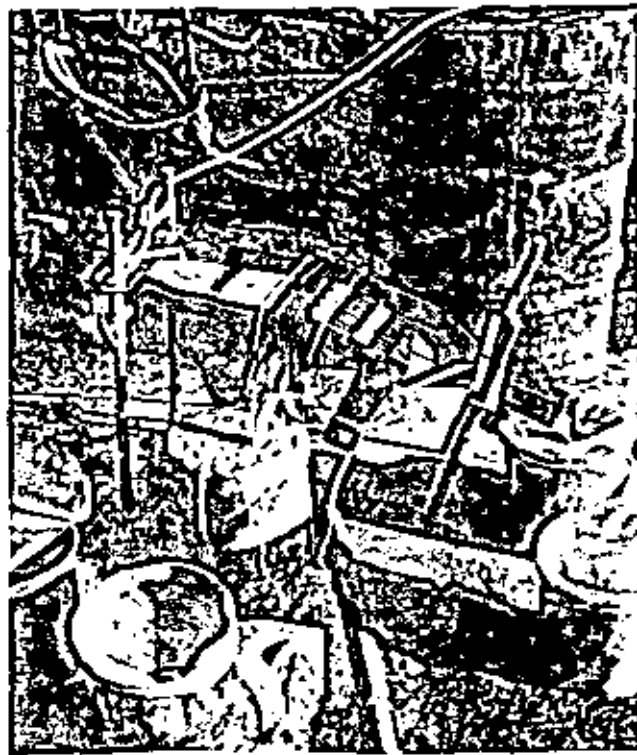
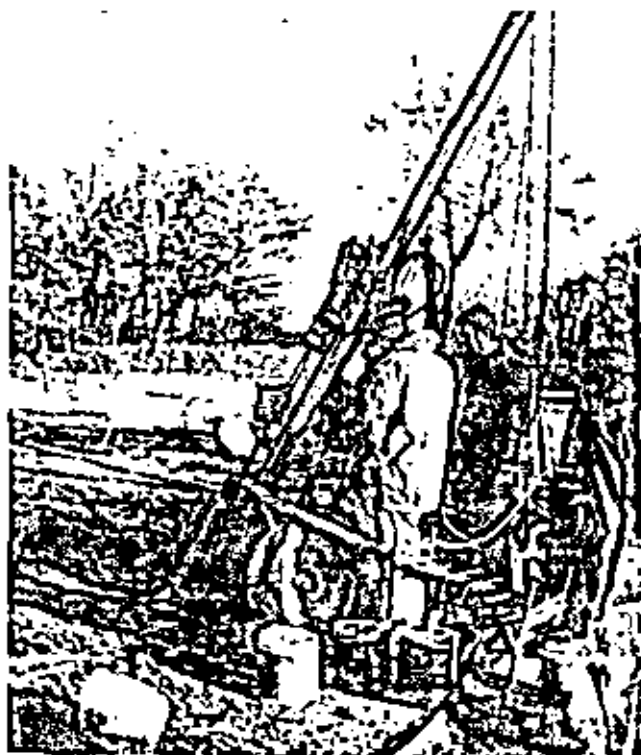


Photo n° 4 : Exécution d'un prélèvement géochimique à la moto-lanère sur le versant de la vallée de Bodennec, en 1961.





Photo n° 5 : Mesures de polarisation spontanée à Bodennec



Photos n° 6 et 7 : Sondage wagon-drill, Phase d'exécution avec injection d'eau. Vue de la goulotte de récupération des cuttings, divisant l'échantillon.



### III - Mise au point méthodologique : la recherche actuelle des indices Pb-Zn-Cu-Ag armoricains

Les méthodes de prospection utilisées pour détecter de nouveaux indices Pb-Zn-Cu-Ag dans les formations volcano-sédimentaires armoricaines se sont affinées au cours des dernières années. Les renseignements qui sont exposés ci-après, concernent uniquement les opérations du B.R.G.M. Plus tard, lorsque l'expérience acquise par d'autres compagnies minières explorant le Massif Armorcain pourra être consignée dans des publications, peut-être à l'occasion du Congrès International de Géologie en 1980, il sera sans doute possible de faire la synthèse des résultats obtenus par tous les opérateurs sur le plan de la méthodologie de la recherche.

Il est cependant actuellement impossible de passer sous silence la belle découverte faite en 1975-76 par la Société Nationale Elf Aquitaine (SNEA) au moyen d'une prospection magnétique et électromagnétique aéroportée, à Rouez (Sarthe), à savoir la mise en évidence d'un très volumineux amas à pyrite-pyrrotine et sulfures de plomb, zinc et cuivre dans une série détritique montrant des traces de volcanisme d'âge briovérien supérieur. La prospection géophysique aéroportée sera donc évoquée dans cette note à propos de la phase la plus en amont de la recherche. En outre, parmi les métallogènes orientant les travaux actuels sera cité celui du Briovérien Supérieur, ce nouveau guide de recherche étant évidemment dû aux travaux de la SNEA à Rouez.

Il est par contre trop tôt pour parler des résultats des études scientifiques qui sont actuellement entreprises par le B.R.G.M. sur les chapeaux de fer et la dispersion des métaux au cours de l'altération supergène dans un but d'application à la recherche des amas sulfurés. A l'exception des informations déjà publiées, il ne sera pas fait état de données provenant de ces études dans la présente note.

#### La phase de recherche d'indices ou d'anomalies

La recherche d'indices est généralement programmée à l'intérieur de régions favorables définies sur les cartes géologiques. Les types de prospection utilisés sont les suivants :

- la *prospection géochimique stratégique* couvrant soit l'ensemble d'un bassin sédimentaire (comme ce fut le cas des premières campagnes du B.R.G.M. dans le Bassin de Châteaulin) soit une bande de terrain d'âge déterminé ;

- la *prospection géophysique aéroportée* (Input-Mag) couvrant également de vastes entités géologiques délimitées sur carte ;

- la *prospection directe des chapeaux de fer* généralement accompagnée d'une prospection géochimique stratégique.

#### 1) La prospection géochimique stratégique

La méthode initialement pratiquée consistait à prélever 3 échantillons en ligne en travers du réseau hydrographique, tous les 250 mètres, l'un au centre de l'alluvion en sol sur berge, les deux autres sur les versants droit et gauche, à hauteur d'œil, en sol, vers 0,20 m de profondeur. Cette méthode dont l'efficacité avait été parfaitement démontrée, a été simplifiée et modifiée de la manière suivante :

- en *stratégie régionale de première reconnaissance* un seul prélèvement est effectué au centre de la vallée à l'intervalle de 500 mètres, de préférence dans les dépôts boueux du lit vif (stream sédiment), à défaut dans le sol sur berge ;

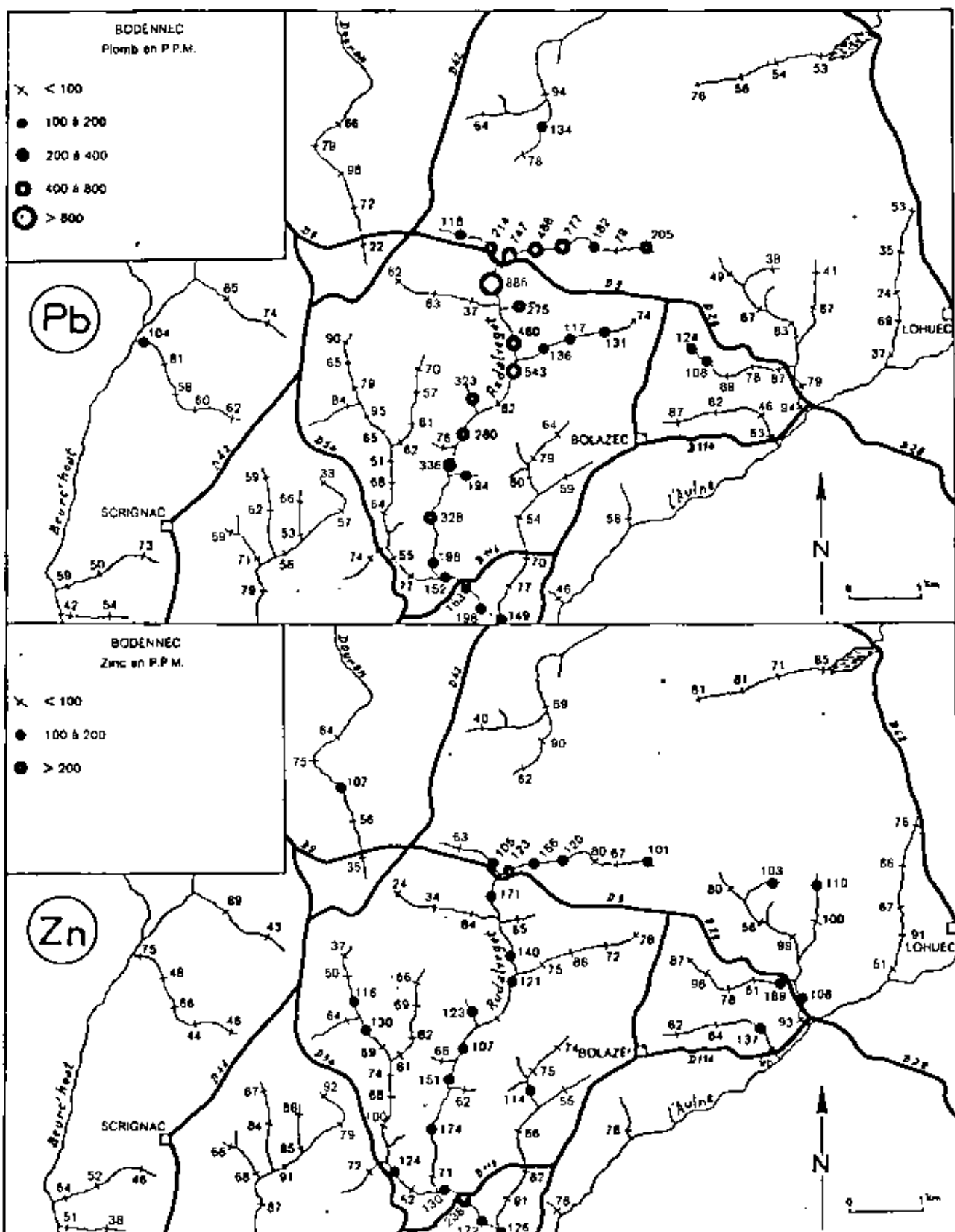
- en *stratégie orientée* sur un niveau géologique déterminé porteur d'indices ou de ferrières, les trois prélèvements sont effectués toujours à intervalles de 500 mètres, mais le prélèvement central en stream ou dans la berge est seul analysé dans un premier temps ; les prélèvements latéraux ne sont analysés que si une anomalie est obtenue dans les valeurs des prélèvements centraux.

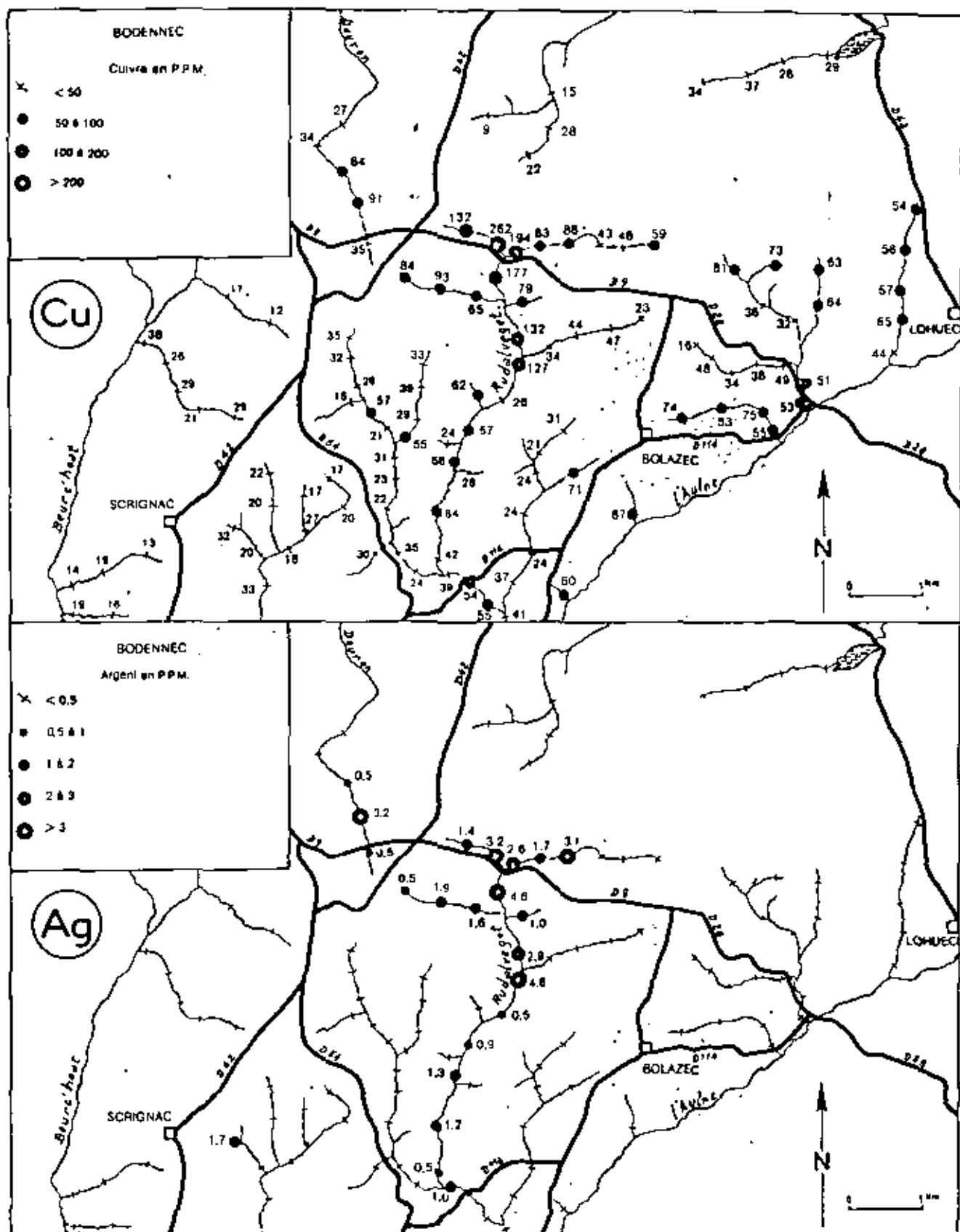
L'ancienne méthode d'analyse colorimétrique à la dithionite après attaque chloro-nitrique à chaud n'est plus utilisée malgré sa bonne sensibilité et la validité des valeurs obtenues pour Pb et Zn. Les échantillons séchés à l'étuve et tamisés à 0,125 mm sont maintenant analysés en spectrométrie optique d'absorption (S.O.A.) pour Pb-Zn-Cu-Ag, au laboratoire du B.R.G.M. à Orléans. La limite de sensibilité pour Ag est actuellement de 0,5 ppm.

Quelques exemples d'anomalies géochimiques stratégiques sont représentés sur les figures 2, 3 et 4 pour donner une idée des concentrations en métal au voisinage immédiat des gîtes.

A Bodennec la prospection stratégique (relatée à la fin de 1974 à la maille 500 m) donne pour les échantillons alluviaux de type stream des maxima de 390 ppm Pb, 280 ppm Zn, 134 ppm Cu et 3 ppm Ag à proximité du gisement. A Menez-Albot on note 3 points de 86, 160 et 700 ppm Pb, un point à 165 ppm Zn, 193 ppm Cu et 1,5 ppm Ag. Enfin à la Porte-aux-Moines, une anomalie très discrète apparaît avec des valeurs de 40 à 180 ppm Pb, 240 à 290 ppm Zn, 50 à 80 ppm Cu et un point à 0,9 ppm Ag. On voit donc que sauf dans le cas exceptionnel où le gisement est entaillé par une vallée comme à Bodennec, les anomalies sont presque ponctuelles et qu'il est nécessaire de prélever dans tous les affluents et sous-affluents, y compris les petits thalwegs.

Des études en cours de L. LAVILLE-TIMSIT portant sur les fractions paramagnétiques des échantillons de stream dans lesquelles se concentreraient certains métaux, devraient permettre d'améliorer la sensibilité de la méthode stratégique.





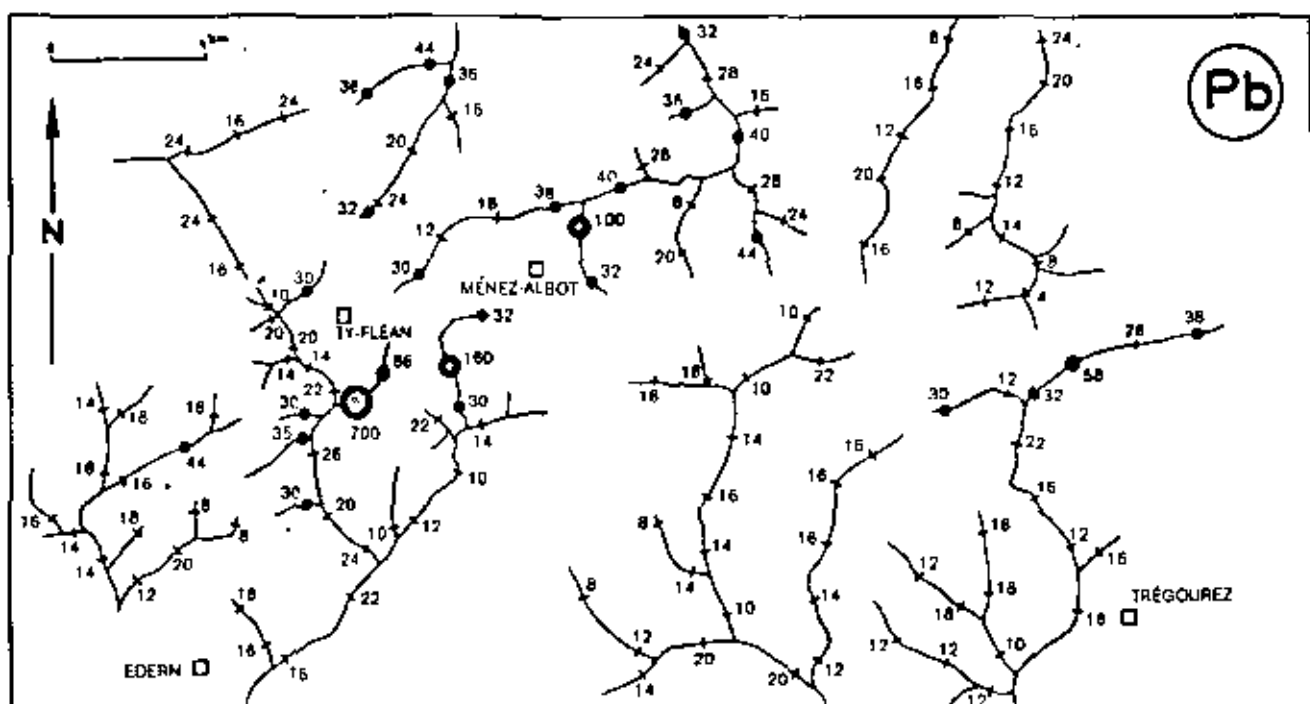


Fig 3 - Résultats de la prospection géochimique stratégique de Menez-Albot - Plomb en PPM.

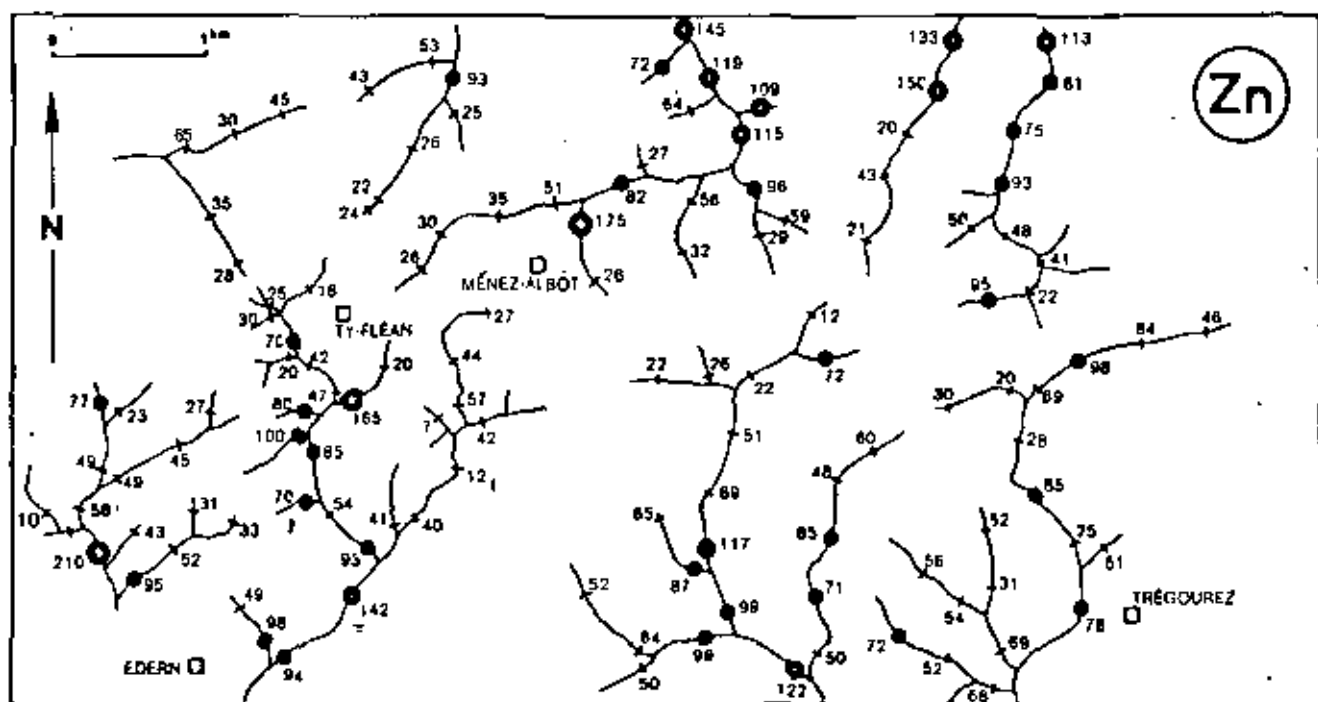
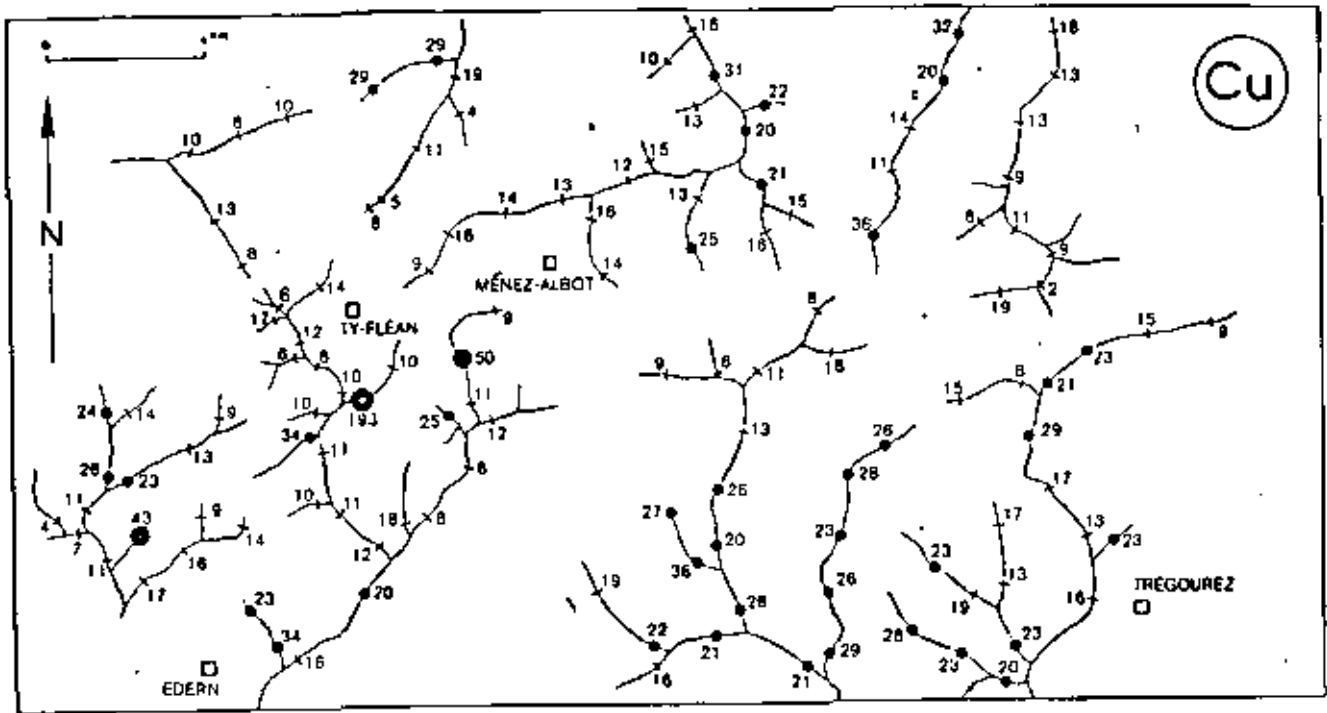


Fig 3 - Résultats de la prospection géochimique stratégique de Menez-Albot - Zinc en PPM



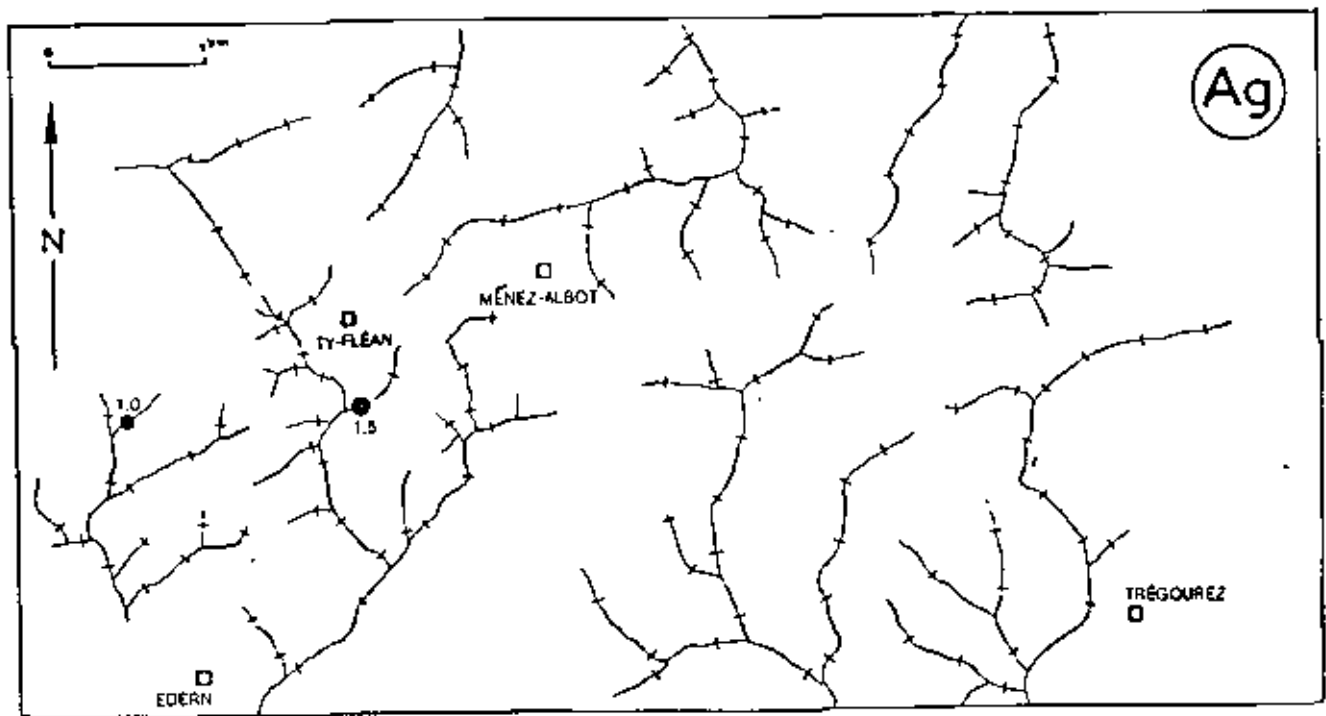
x &lt; 20

● 20 à 40

● 40 à 100

● &gt; 100

Fig. 3 - Résultats de la prospection géochimique stratégique de Menez-Albot - Cuivre en PPM.



x &lt; 0.5

● 1

● 1.5

Fig. 3 - Résultats de la prospection géochimique stratégique de Menez-Albot - Argent en PPM

### 2) La prospection géophysique aéroportée

La prospection électromagnétique Input et magnétique aéroportée est utilisée par certaines sociétés minières opérant dans le Massif Armoricain. Un premier succès a été obtenu par la SNEA qui a mis en évidence durant l'été 1975 une très belle anomalie EM et Mag (champ total) à Rouez, à 6 km au SE de Sillé-le-Guillaume. Cette anomalie correspondait à un très bel amas pyriteux et à pyrrhotine minéralisée qui fut traversé par un premier sondage au début de 1976.

Cette méthode bien adaptée pour la détection des gros amas semble beaucoup moins sensible pour les petits amas ou les couches sulfurées minces, comme l'ont montré des contrôles sur les gisements de Bodennec et de la Porte-aux-Moines. Cependant des conclusions sur la validité de la méthode, compte tenu des types de présentation des concentrations à Cu-Pb-Zn armoricaines ne pourront pas être tirés avant plusieurs années.

Généralement, la prospection aéroportée Input-Mag fournit un très grand nombre d'anomalies dont la tri est assez long et pour lequel, sauf cas exceptionnel comme à Rouez, la prospection géochimique stratégique doit être employée. Son emploi ramène donc le plus souvent au cas de la prospection stratégique orientée décrite au paragraphe précédent.

### 3) La prospection directe des chapeaux de fer

L'altération météorique du substratum est très variable dans le Massif Armoricain, parfois intense et profonde dans les secteurs où subsistent de vieilles surfaces de pénéplanation. Ceci explique que les formations pyriteuses soient assez souvent oxydées aux affleurements pour former des « chapeaux de fer » plus ou moins épais.

Or, tous les gîtes de fer oxydé superficiels ont fait l'objet d'une prospection intensive depuis le Moyen Âge en vue d'alimenter de nombreux fourneaux et forges. Les archives signalent, en effet, un grand nombre de fermiers dont les emplacements se retrouvent sur les cartes topographiques, les fonds cadastraux et les cartes géologiques. Certaines fosses non remplies sont en outre décelables par l'examen des photos aériennes.

Les nombreuses analyses effectuées à ce jour montrent que les chapeaux de fer qui coiffent des minéralisations sulfurées à Cu-Pb-Zn-Ag sont eux-mêmes anormalement minéralisés en métaux, en particulier en plomb, argent et cuivre. Des études d'un grand intérêt pour la prospection sont actuellement en cours sur des échantillons de chapeaux de fer provenant de plusieurs pays, dont la Bretagne, dans des environnements chimiques différents, carbonatés ou non. La publication de J. BARBER et E. WILHEM (1978) expose quelques résultats obtenus sur des fragments de « chapeau » provenant de Bodennec et Saint-Rivoal. Les teneurs en Pb-As-Cu et parfois Bi y sont élevées, alors que la pauvreté en Zn est manifeste. Ces phénomènes de concentration ou dispersion sont étudiés par L. LAVILLE-TIMSIT à l'échelle du

profil d'altération tout entier. Une note concernant Bodennec a été publiée récemment (L. LAVILLE-TIMSIT et al., 1976).

La recherche des ferrières anciennes est systématiquement effectuée dans les régions où des séries volcano-sédimentaires ont été cartographiées ou signalées. Le *guide stratigraphique* est utilisé pour la prospection des ferrières armoricaines dans la mesure où les cartes géologiques sont suffisamment précises. Sont prospectés en priorité le Dévonien Intérieur ou le Siluro-Dévonien pour le modèle Bodennec et Porte-aux-Moines, le Briovérien Supérieur pour le modèle Rouez, sans négliger les autres épisodes volcaniques du Paléozoïque et du Briovérien Intérieur (modèle Trémuson).

Lorsque l'échantillonnage des ferrières a conduit à des anomalies (Pb-Cu, etc.) une prospection stratégique est aussitôt entreprise si elle n'avait pas été faite antérieurement. Ensuite, l'indice est étudié en prospection géochimique tactique (quadrillage en sols).

#### L'examen préliminaire des indices

Lorsqu'une anomalie géochimique stratégique a été obtenue, une première reconnaissance du terrain est nécessaire pour noter et cartographier tous les éléments lithologiques et structuraux ainsi que les oxydes de fer visibles en chapeaux plus ou moins massifs ou en simples éboulis clairsemés. Des échantillonnages de ces zones oxydées sont toujours effectués.

L'intensité des anomalies stratégiques, la présence de ferrières minéralisées et la nature favorable du contexte géologique sont des éléments à prendre en considération pour attribuer à la zone anormale une certaine priorité pour une étude détaillée. Dans certains cas, l'image de l'anomalie est améliorée en réalisant une prospection stratégique complémentaire à la maille de 250 mètres, comprenant évidemment l'analyse de tous les échantillons de versants.

Les méthodes utilisées par le B.R.G.M. pour l'étude des anomalies stratégiques sont les suivantes :

- géochimie tactique consistant en quadrillage de prélèvements de sols ;
- prospections géophysiques au sol ;
- sondages pénétrants d'exploration (wagon-drill et tranchées).

#### 1) La géochimie tactique Pb-Zn-Cu-Ag

Les périmètres de prospection tactique (fig 5) sont établis sur la carte topographique de manière à encadrer toutes les zones de versants situées en amont des concentrations anormales alluviales. Les prélèvements se font dans les sols à la profondeur de 0,25 m environ, suivant une grille dont les dimensions les plus courantes sont 100 x 50 m ou 50 x 50 m. Les grilles rectangulaires sont employées lorsque l'on est certain de la direction d'allongement du gîte recherché.



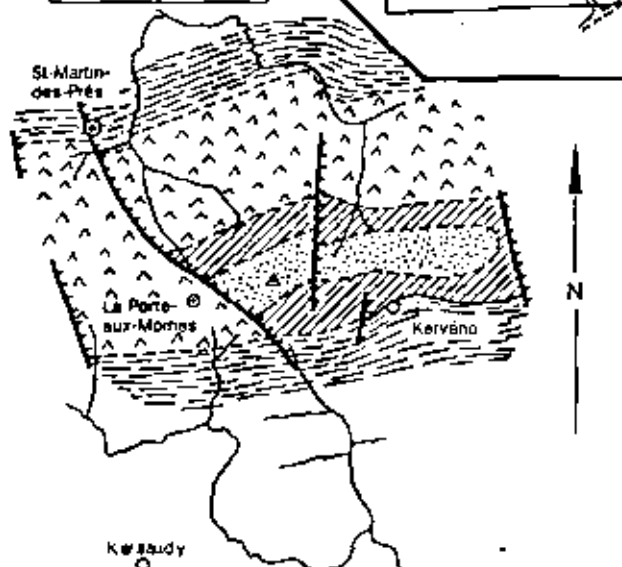
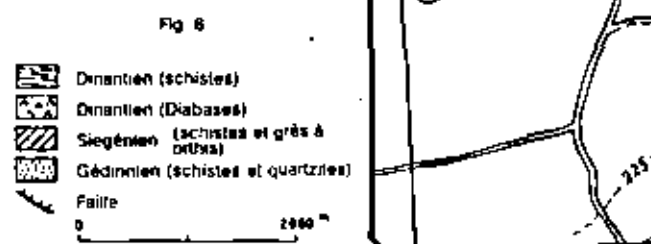
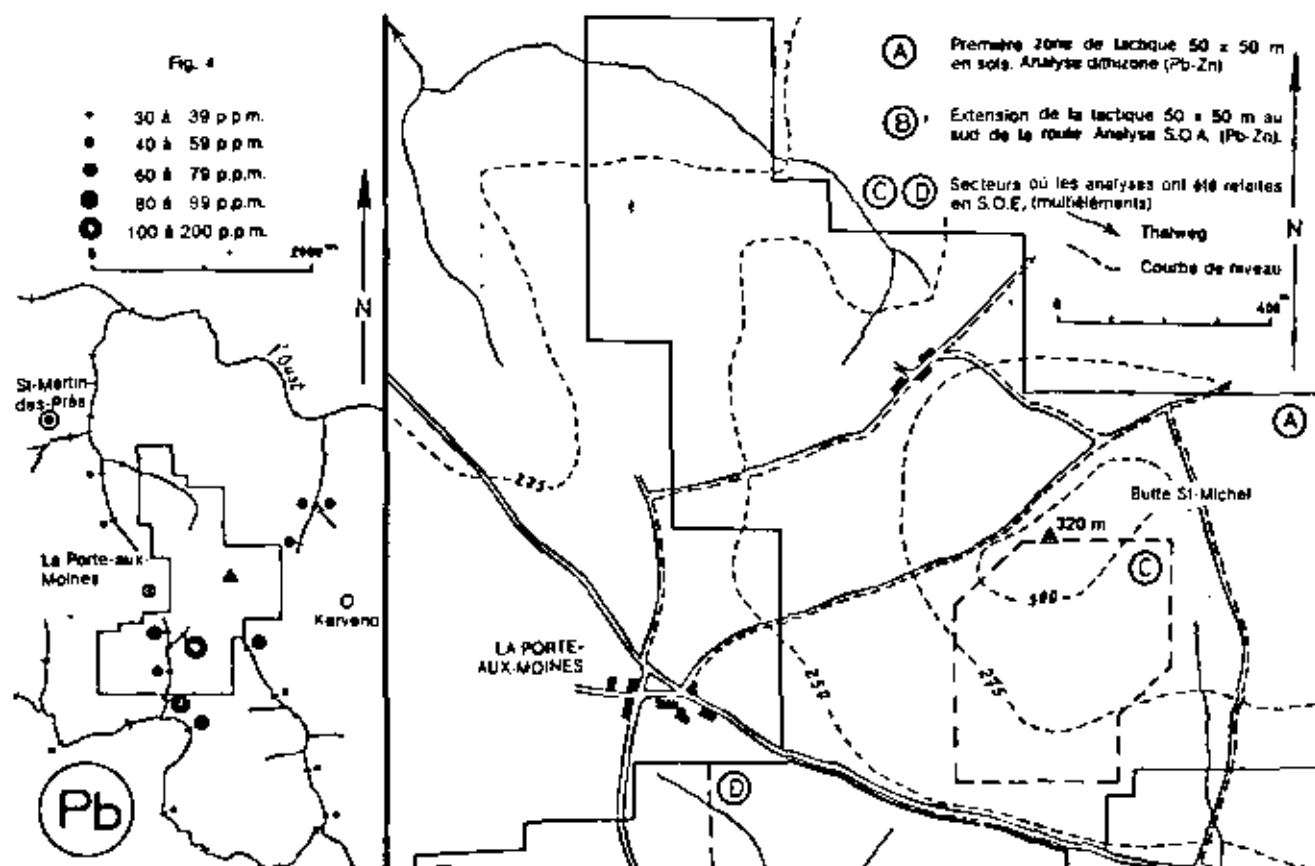


Fig. 4 - Prospection géochimique stratégique à la Porte-aux-Moines - Résultats pour le plomb.

Fig. 5 - Périmètres des prospections géochimiques tactiques à la Porte-aux-Moines - Topographie et hydrographie.

Fig. 6 - Unités géologiques du secteur Porte-aux-Moines d'après la carte géologique (feuille 1/50.000 - OULNTR).



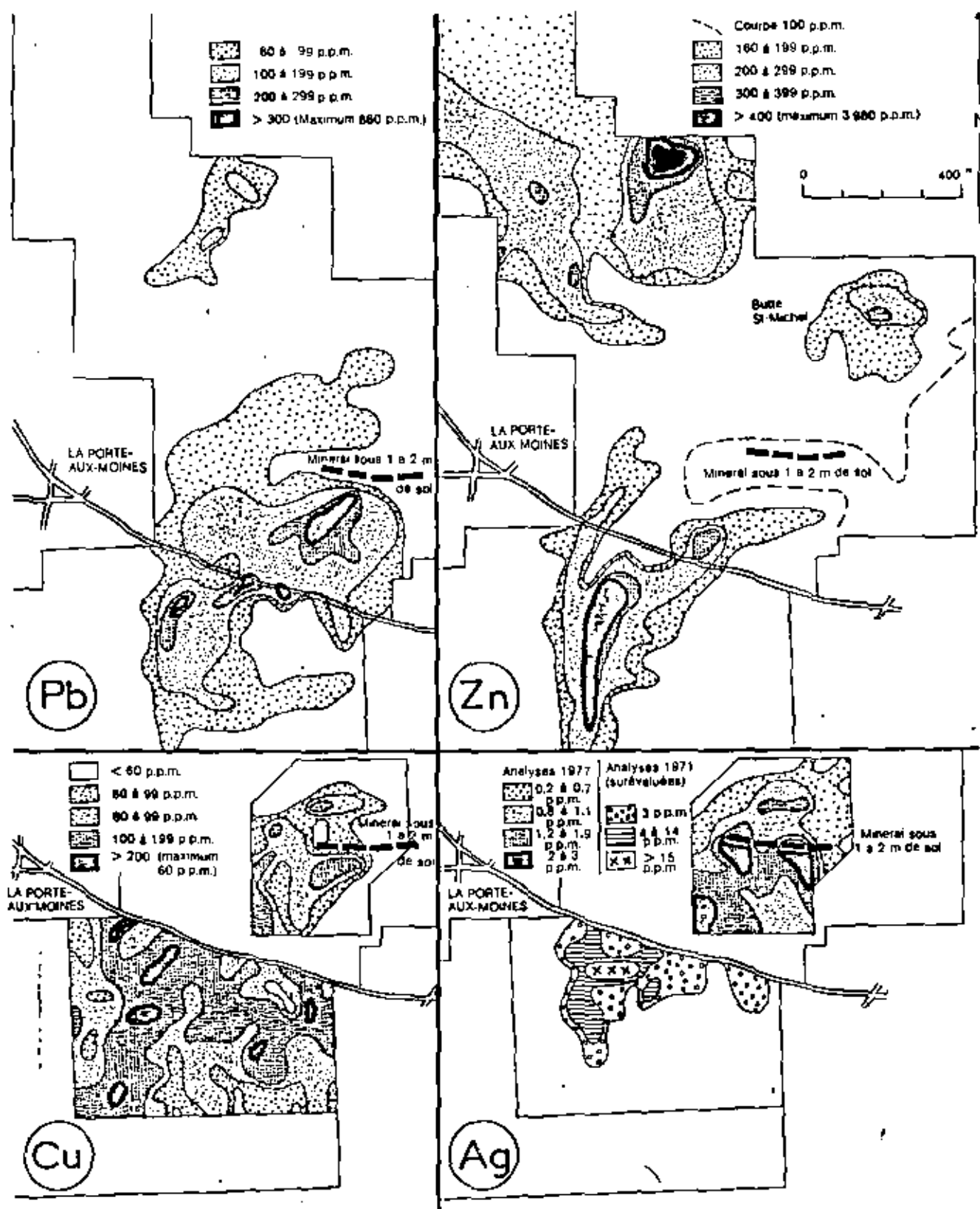


Fig 7 - Résultats des prospections géochimiques (actives 150 x 50 m) dans le secteur de la Porte-aux-Moines

Les cartes de répartition des teneurs sont établies pour chacun des métaux recherchés. L'exemple de la Porte-aux-Moines est présenté sur les cartes de la figure n° 7. Le drainage naturel se faisant vers le Sud, on voit que l'anomalie Pb a son maximum à moins de 200 mètres en aval-pente de l'intersection du gisement avec la surface topographique. Les anomalies Ag et Cu commencent au gisement lui-même pour s'étaler ensuite vers la vallée. Le zinc paraît le plus mobile, la concentration ne commençant qu'à plus de 200 mètres du gisement.

Ces conclusions sont valables pour la plupart des autres gisements étudiés, filoniens ou stratiformes. A Bodennec, l'anomalie Zn est disposée en auréole autour de l'anomalie Pb. Du point de vue des teneurs, les valeurs maximales approchent ou dépassent 1 000 ppm pour le plomb, restent comprises entre 180 et 600 ppm pour le cuivre et ne dépassent pas quelques ppm pour l'argent.

La dernière phase de la prospection tactique comporte le plus souvent l'exécution de profils de prélèvements complémentaires à la tarière jusqu'au voisinage de la roche en place, débordant vers l'amont le pôle de l'anomalie Pb, afin de préciser la zone d'enracinement de la minéralisation.

## 2) La prospection géophysique au sol

Les très bons résultats fournis par les mesures de polarisation spontanée à Bodennec et la Porte-aux-Moines ont fait que la méthode a été généralisée pour la prospection de tout le domaine volcano-sédimentaire armoricain. Comme le montrent les figures n° 8 et n° 9, des anomalies P.S. sont bien centrées sur les zones d'oxydation des corps sulfurés, donnant une bonne idée de la direction et de l'extension des gîtes. Il s'agit d'anomalies négatives dont les maxima sont compris entre 300 et 500 mv.

Les mesures de potentiel sont effectuées à l'aide de deux électrodes impolarisables, mises en contact avec le sol par une solution de sulfate de cuivre saturée suintant à travers les parois poreuses. Ces électrodes sont préalablement mises en équilibre dans un bain de solution sulfurée. Une tige de cuivre transmet les courants vers le câble de liaison dont l'isolation doit être souvent ventillée. Les différences de potentiel entre les électrodes (l'une fixe, l'autre mobile) sont lues sur un millivoltmètre électronique dit PS-mètre (modèle B.R.G.M.).

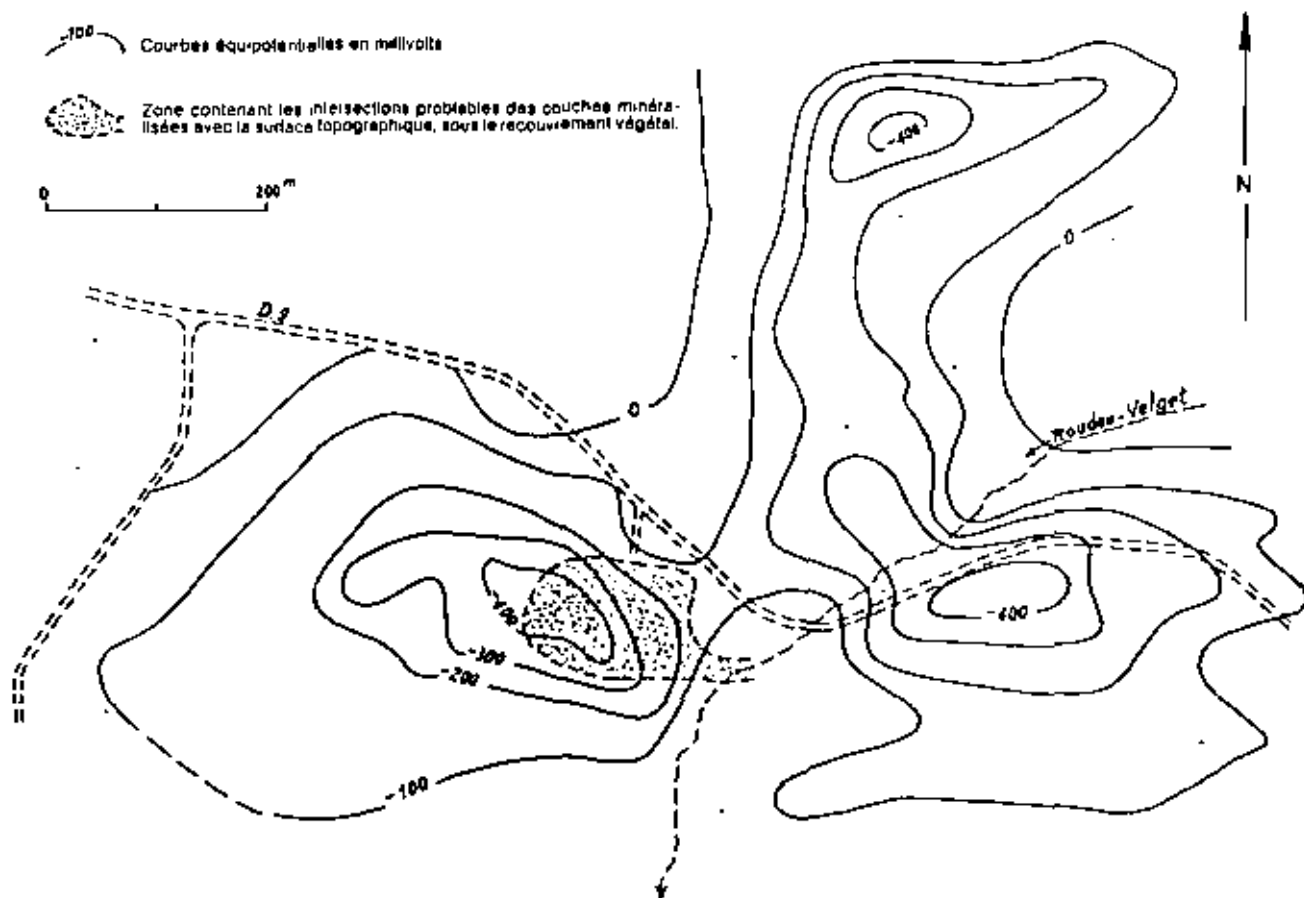


Fig. 8 - Anomalie de polarisation spontanée de Bodennec (Finistère)



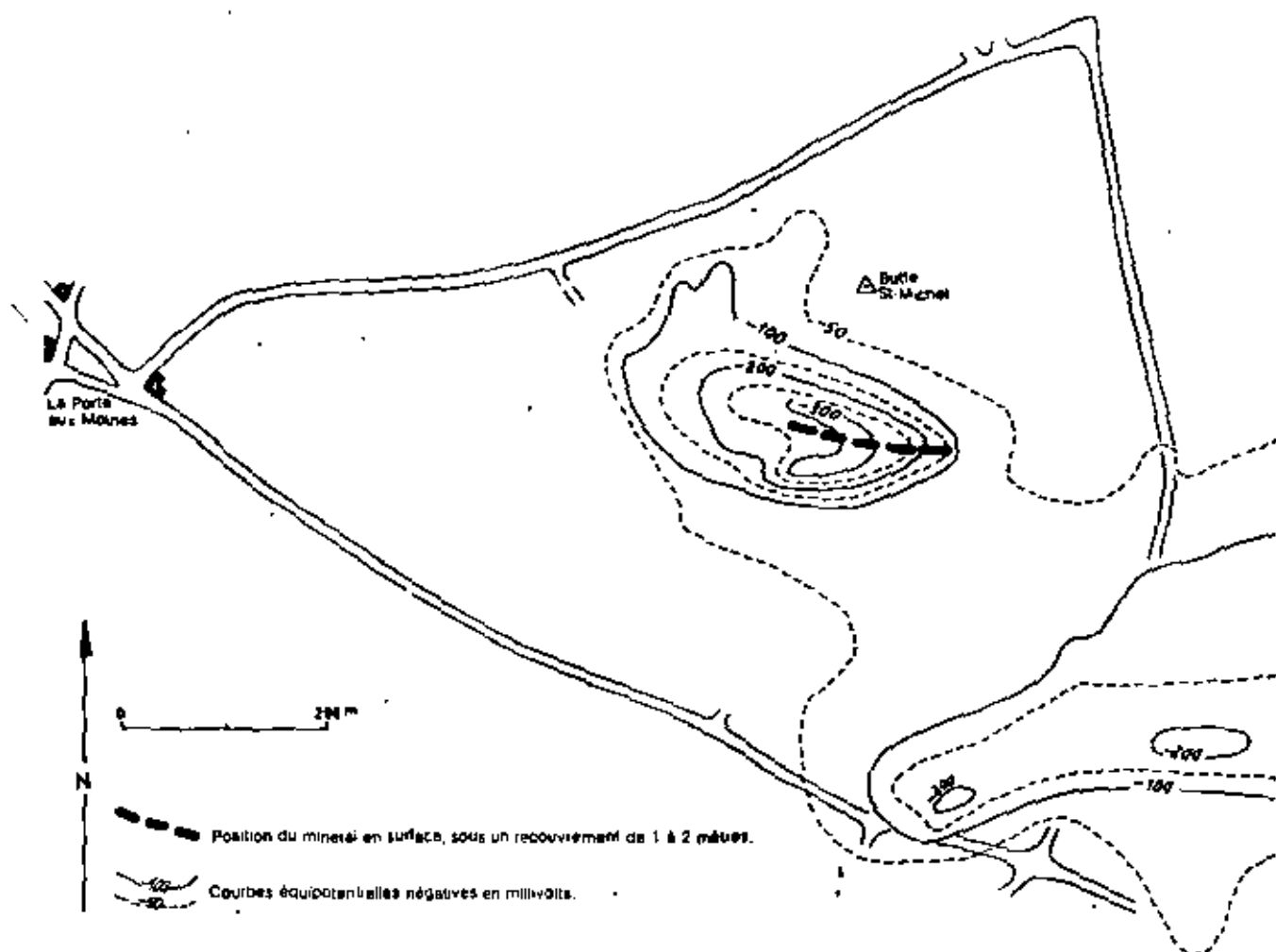


Fig. 9 - Anomalie de polarisation spontanée à la Porte-aux-Moines (Côtes-du-Nord)

L'intervalle entre mesures est de 20 mètres suivant des lignes de cheminement d'espacement variable n'excédant pas 150 mètres. Il est possible d'améliorer l'image P.S. en resserrant la maille. Ce fut le cas à la Porte-aux-Moines où une P.S. à la maille régulière de 50 x 20 m détaille bien les contours des équipotentielles (J.P. LESCOFF et B. MADELAINE, 1976).

Le phénomène P.S. ne se produit pas dans les zones marécageuses et se trouve perturbé dans les thalwegs qui ont un effet positif sur les potentiels. Les anomalies ne localisent pas d'une façon spécifique les zones oxydées des gisements mais se forment aussi remarquablement sur les schistes graphiteux, les shales noirs plus ou moins pyriteux, et certaines zones de quartzites. La méthode P.S. doit donc toujours être couplée avec la prospection géochimique, la coïncidence des anomalies de potentiel et des anomalies

géochimiques tactiques Pb-Cu-Ag étant seule déterminante, en tenant compte cependant d'un léger décalage possible de l'anomalie géochimique suivant les lignes de pente.

Parmi les autres méthodes géophysiques qui ont été essayées au stade du contrôle des anomalies géochimiques tactiques, il y a lieu de citer la prospection électromagnétique VLF et la prospection électrique par profils ou rectangles de résistivité. La première, de mise en œuvre rapide, met en évidence des anomalies positives (valeurs dérivées) qui localisent assez bien les gîtes sulfurés, comme cela a été prouvé à Bodennec (A. BARBIER, 1975) et à la Porte-aux-Moines (J.P. LESCOFF et B. MADELAINE, 1976). Mais, comme pour la P.S., d'autres anomalies liées à des formations géologiques conductrices sont également obtenues en VLF, si bien que le contrôle géochimique est indispensable. Il en est de même des anomalies de résistivité qui sont cependant moins souvent utilisées.

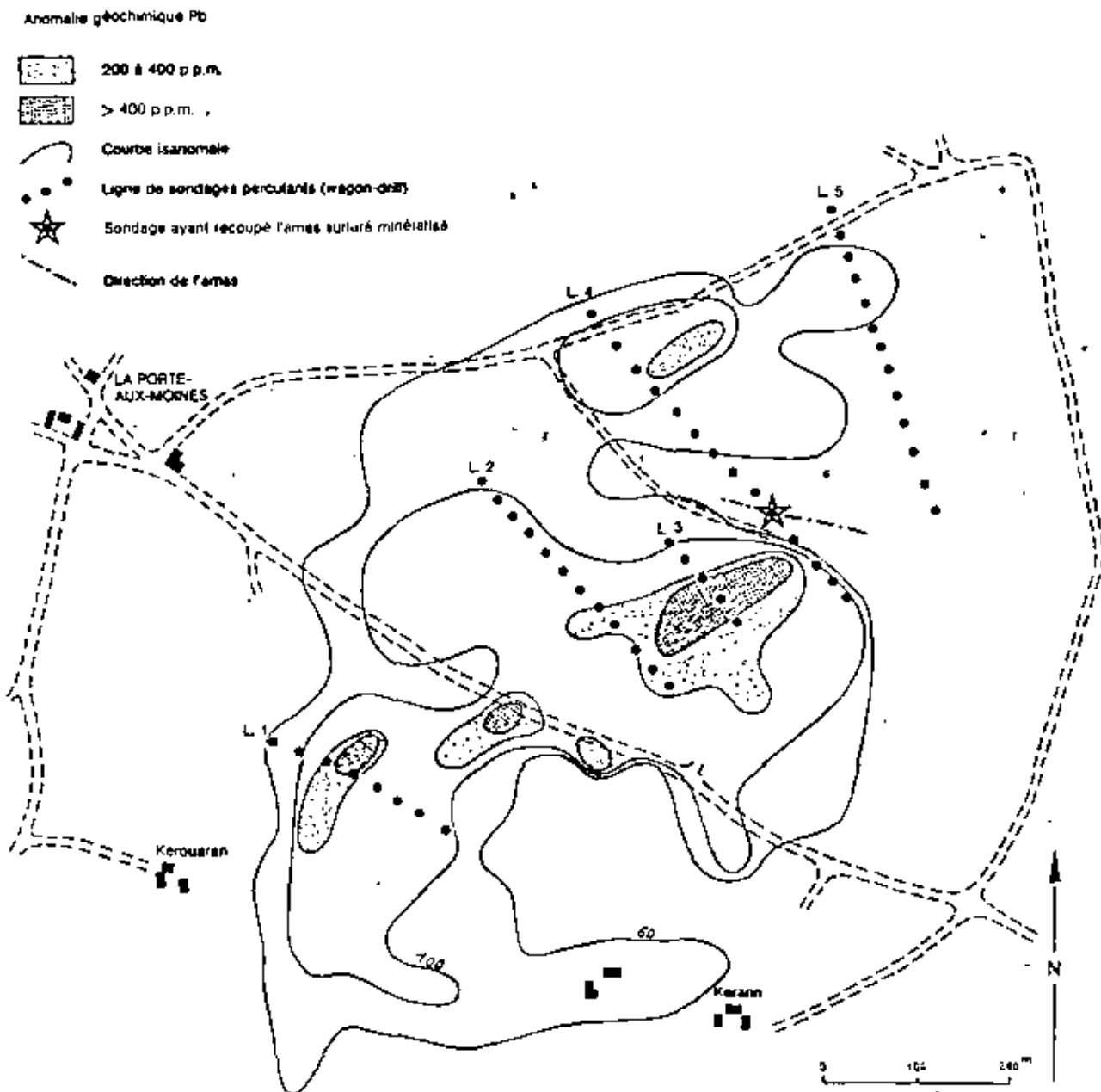
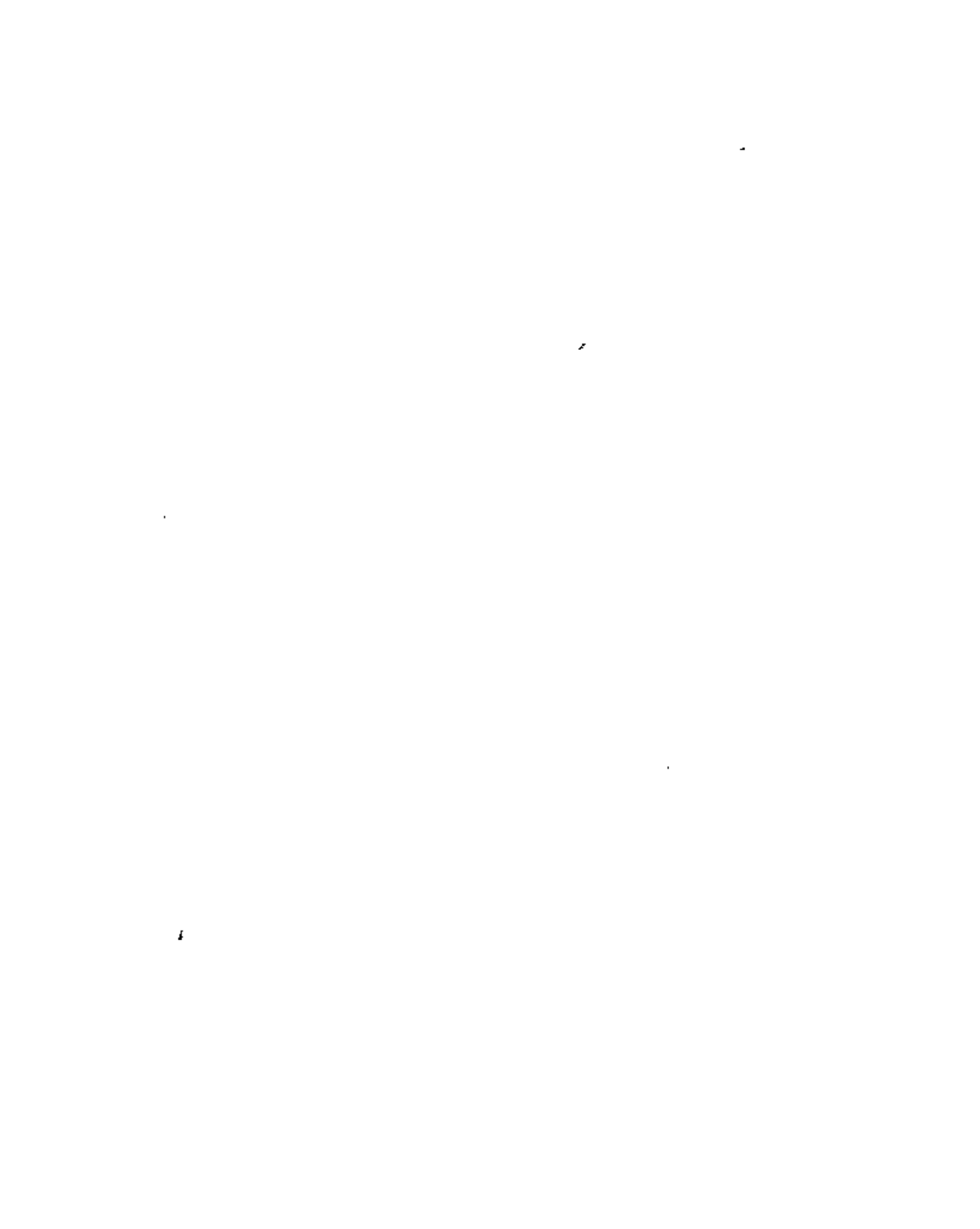


Fig 10 - Localisation par sondages wagon-drill du corps sulfuré Pb Zn Cu à la Porte-aux-Mornes en 1975

Il y a lieu de remarquer qu'un seul sondage a recoupé le gisement. Cette campagne de wagon-drill a été exécutée avant le levé géophysique P.S.



### 3) La reconnaissance par sondages percutants

En raison de la végétation et des cultures couvrant le substratum presque toujours fortement altéré, il est impossible de détecter des indices de minéralisation Pb-Zn-Cu à la surface du sol, même dans des éboulis. Si les zones d'enracinement des concentrations géochimiques ont pu être précisées par des profils de prélèvements à la tarière, il est parfois possible de mettre à nu la gîte en place par des tranchées. Mais, le plus souvent, compte tenu des cultures et des contraintes imposées par les propriétaires des terrains, il est impossible de réaliser des métrages suffisants de tranchées pour y voir clair. L'exécution de sondages percutants est plus facile et a l'avantage de permettre de recouper les minéralisations au-dessous de la zone très altérée, au besoin à différentes profondeurs en vue de déterminer le pendage.

Les sondages sont implantés suivant des lignes traversant les anomalies géochimiques Pb-Cu-Ag, en débordant nettement en amont. L'équidistance entre sondages est de 20 à 25 mètres (fig. 10 et 11). En l'absence de toute information sur les pendages des minéralisations recherchées, il est réalisé à chaque emplacement un couple de 2 sondages inclinés dans des directions divergentes. Dans d'autres cas, il n'y a pas d'inconvénient à adopter des sondages verticaux.

La sondeuse utilisée est un wagon-drill Atlas Copco BVD 14 muni d'une glissière à chaîne (BMM 25 K 153) et d'un marteau perforateur lourd YAK BBC 120 F, le tout pesant 700 kg environ. Les tiges longues de 2,435 m sont creusées pour permettre l'injection centrale d'air ou d'eau. Un premier taillant de 77 mm fore un avant-trou

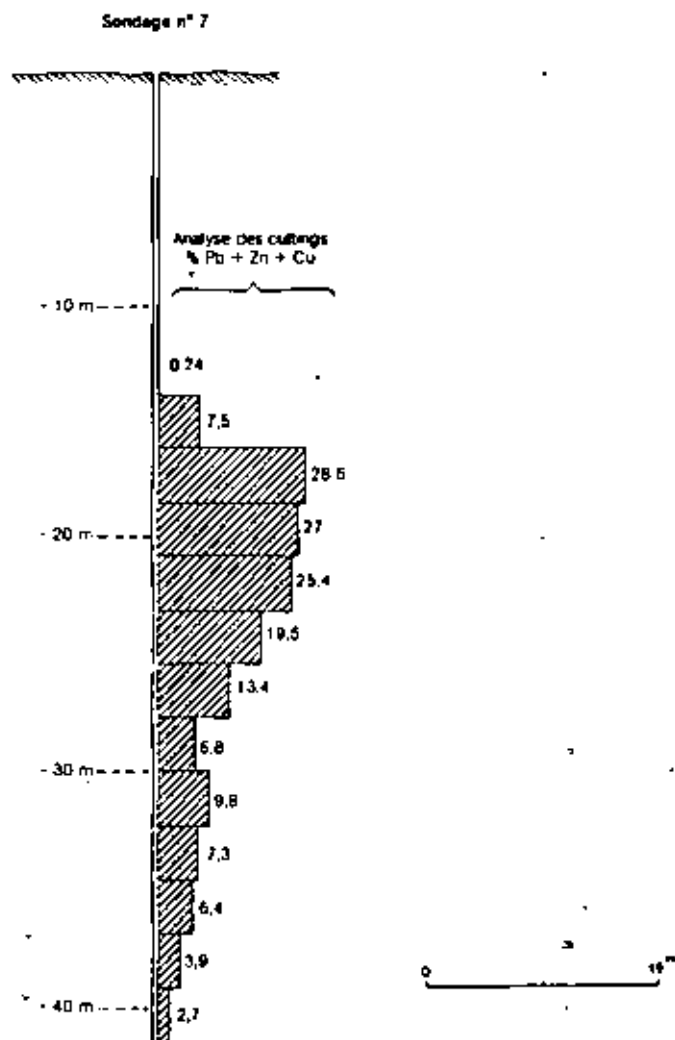


Fig. 11 - Coupe du sondage percutant S 7 (ligne 4) sur la butte de la Porte-aux-Moines

de 2 m tubé en 2". Ensuite, le forage est exécuté avec un taillant de 57 mm sans tubage.

L'air comprimé est fourni par 2 compresseurs Spiros montés sur camion, un CK 6 de 120 CV débitant de 10 à 12 m<sup>3</sup>/mm et un CK 2 de 50 CV débitant 4 m<sup>3</sup>/mm. La première partie du forage est forée à sec parfois jusqu'à 25 ou 30 mètres ; ensuite l'injection d'eau est nécessaire. Une pompe Trido sur remorque pouvant débiter 75 l/mm à 30 kg/cm<sup>2</sup> assure l'alimentation en eau.

Un tel équipement est prévu pour la réalisation de forages jusqu'à la profondeur de 70 mètres. Cependant, il est préférable de se limiter à 50 mètres. L'échantillonnage des « cuttings » est exécuté pour chaque longueur de tige, soit 2,40 m. Lors du forage à sec, les cuttings sont captés à la sortie d'un tuyau flexible fixé sur la branche horizontale du té coiffant le tubage. Ils sont quartés à la pelle sur une tôle. Pour le forage à l'eau, on adapte sur le tuyau d'arrivée des produits un bac horizontal en forme de raquette, muni de cloisons et de perforations qui divisent l'échantillon dans le rapport 1/2, 1/4 et 1/8.

Ce wagon-drill permet des rendements de 2 000 à 3 000 m par mois avec un seul poste journalier de travail. Le prix de revient moyen du mètre foré est en moyenne de 50 à 55 F. La sélectivité de l'échantillonnage est acceptable, malgré les variations de la récupération. Les teneurs obtenues doivent être considérées uniquement comme *indicatives*.

Pendant l'exécution du forage des contrôles systématiques à la batée sont effectués. Sauf minéralisation bien visible et continue, une passe sur 3 seulement est analysée dans un premier temps. Les teneurs qui atteignent ou dépassent 1 % Pb + Zn + Cu sont considérées comme intéressantes, méritant un contrôle par carottage.

En raison de sa rapidité d'exécution, son faible coût et la validité des résultats fournis qui ne peut plus être mise en doute actuellement, le sondage percutant est l'outil indispensable pour trier les anomalies géochimiques et géophysiques et sélectionner les cibles dont l'exploration mérite d'être poursuivie.

#### IV - Remarques et conclusions

Les méthodes de prospection qui viennent d'être exposées sont bien adaptées à la recherche d'indices Pb-Zn-Cu-Ag de type volcano-sédimentaire dans les conditions géomorphologiques du socle armoricain, c'est-à-dire dans un pays de relief pénéplané faiblement rajeuni où le substratum altéré est masqué par la couverture végétale. La prospection directe au marteau est inefficace dans un tel pays, surtout pour la détection des niveaux pyriteux très décomposés en surface, en particulier celle du couple shales noirs-tuffites où se localisent préférentiellement les indices.

L'efficacité des méthodes employées peut être cependant perturbée par la présence de recouvrements alloctones plus ou moins épais, tels que les sables continentaux et marins du Tertiaire, en particulier dans la moitié orientale de la Bretagne, le Maine et l'Anjou. Mais jusqu'à présent, il n'a pas été trouvé de secteur où les prospections géochimiques et géophysiques de surface étaient totalement impuissantes.

La prospection géochimique a une place prépondérante dans toutes les phases de la recherche précédant les sondages. Elle permet le tri des anomalies géophysiques et fournit seule des critères de choix décisifs dans les secteurs où la prospection a été décidée pour des raisons géologiques (présence de volcanisme et de chapeaux de fer, guide stratigraphique).

Enfin la remarquable efficacité des sondages percutants doit être soulignée. Implantés en lignes suivant une maille très souple, exécutés en un temps record, ces forages jettent un premier « coup de filet » sur une tranche verticale de 40 à 50 mètres, et renseignent d'une façon déterminante sur la morphologie du gîte recherché, l'existence ou l'absence de concentrations sulfurées massives au sein de zones contenant des traces disséminées, enfin l'ordre de grandeur des teneurs pour les traversées plurimétriques de minéral.

Une telle prospection ne s'occupe évidemment que des minéralisations qui ont été atteintes par l'érosion et qui ont contaminé les alluvions et les sols. Dans une autre note parue dans cette Chronique consacrée à l'exploration détaillée des gisements, le problème de l'extension des masses minéralisées sera abordé et en particulier la détection de corps sulfurés situés nettement au-dessous de la surface topographique et ne donnant aucune anomalie en surface. Bien peu de résultats sont encore obtenus dans ce domaine. Il serait donc illogique et prématuré de lancer dès maintenant des recherches sur les gîtes entièrement cachés, sans qu'aient été définis des modèles de gisements armoricains. Ce n'est qu'après l'exploration complète des gisements découverts en surface et de leurs extensions en profondeur que l'on pourra déterminer les méthodes et les guides adaptés à cette prospection particulièrement difficile.





## Références bibliographiques

BARBIER J. et WILHELME E. (1978). - Superficial geochemical dispersion around sulphidic deposits : some examples in France. *Journal of Geochemical Exploration*, 10, p. 1-39.

CHAURIS L., GUIQUES J. (1969). - Gîtes minéraux de la France. Volume I : Massif Armoricain ; notices explicatives régionales des feuilles. *Mém. B.R.G.M.*, n° 74, 96 p.

KERFORNE F. (1926). - Les gisements d'or, d'étain et de cuivre du Massif Armoricain et la Préhistoire. *Institut Finistérien d'études préhistoriques. Bulletins et Mémoires* : 14 p.

LAVILLE-TIMSIT L., LELEU M., WILHELM E. (1976). - Note préliminaire sur le comportement des éléments Cu, Pb, Zn,

Ag, Mn, As, Bi lors de l'altération supergène d'une minéralisation sulfurée. *Bull. Soc. Géol. France*, 71, XVIII, n° 1, p. 101-105.

SAGON J. (1966). - Orogenèse hercynienne précoce et volcanisme dans le Sud-Est du Bassin de Châteaun (Côtes-du-Nord). *91<sup>e</sup> Congrès des Soc. Sav. Rennes*, t. II, p. 300-311.

SAKOWITSCH W. (1963). - Aperçu sur la prospection géochimique. *Ann. Mines*, XI, p. 41-50.

et *Rapports inédits B.R.G.M.* : BARBIER J. - BARBIER J. et WILHELME E. - BARBIER A. - BEAUJOUR A. - BRAIS A. - BRAIS A. et SAKOWITSCH W. - BOULADON J. - CLUSEAU R., GORCHON A., KERUEAN M., MILLON R. et LE FUR Y. - LESCOP J.-P. et MADELAINE B.





DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

GEOQUIMICA MODERNA DE PROSPECCION

ANEXOS A Y B

DR. J. GONI

MARZO, 1982

## La géomicrobiologie et la biominéralurgie

par J. GONI, J. GREFFARD, T. GUGALSKI, MICHEL LELIEU (\*).

Service géologique national, D. R. G. M., Orléans (1).

**Résumé.** — Cet article présente une revue des principales applications de la microbiologie à la géochimie et à la minéralurgie.

Nous montrons, au moyen d'exemples tirés de nos travaux ou de travaux de groupes étrangers, ce que l'étude de certains types de micro-organismes peut apporter à la compréhension des processus géochimiques de basse température, et comment on peut espérer utiliser industriellement cette action.

L'altération des silicates, l'oxydation du fer et du manganèse, l'oxydation des formes réduites du fer et du soufre, la réduction des formes oxydées du soufre sont les principaux domaines de recherches qui ouvrent la voie à des problèmes tels que : la formation des nodules de manganèse, la formation biosynthétique des sulfures, la lutte contre la pollution, la biolixiviation des minerais pauvres.

*Geomicrobiology and biomineralurgy.*

**Abstract.** — This article is a review of main applications of microbiology to geochemistry and ore dressing.

We show, using examples from our works and from foreign works, what the study of certain kind of micro-organism brings to the understanding of low temperature geochemical processes and what are the hopes of industrial applications.

The silicates alteration, the oxidation of iron and manganese, the oxidation of iron and sulfur, the reduction of sulfates are the main areas which lead to problems like : the formation of manganese nodules, the formation of biosynthetic sulfide, the fight against pollution, the biolixiviation of sulfides.

### INTRODUCTION.

On doit à Vernadsky (1924), au cours d'une série de conférences données en 1922 et 1923 à la Sorbonne, d'avoir mis l'accent sur le rôle de la matière organique vivante dans l'ensemble des réactions qui interviennent sur la surface de la croûte terrestre, phénomènes qui intéressent, entre autres sciences : la géologie, la minéralogie, la géochimie.

Depuis cette série de conférences (1895), qui s'appuyaient sur les travaux de microbiologistes comme Beijerinck, Bertrand (1905) et sur les observations, au niveau du profil des sols, des géochimistes, pédologues, comme Winogradski, les travaux dans ce domaine ont été nombreux, et connaissent actuellement un développement important dans différents laboratoires sous le jeu combiné de raisons scientifiques et économiques.

Un vaste domaine d'application de la géomicrobiologie (2) est en effet constitué par le traitement

des minerais par biolixiviation ; la nécessité absolue de s'adresser à des minerais de plus en plus pauvres découle à la fois de l'augmentation croissante de la consommation des métaux, due au développement industriel, et à l'épuisement des minerais les plus riches reconnus ou susceptibles d'être exploités. Cette situation implique la mise au point de méthodes nouvelles de traitement, parmi lesquelles la lixiviation, qu'elle soit chimique ou biochimique, est d'un grand intérêt.

Un autre domaine d'application d'une très grande importance est constitué par la lutte contre la pollution. S'il est inutile de détailler les conséquences secondaires du développement industriel de toute société dont l'économie s'appuie sur la consommation, il convient par contre de préciser la place que peut prendre et qu'occupe déjà la microbiologie dans cette lutte : le domaine de l'épuration des eaux est le plus développé, mais la biodégradation de nombreux matériaux constitue un domaine de recherche en plein développement.

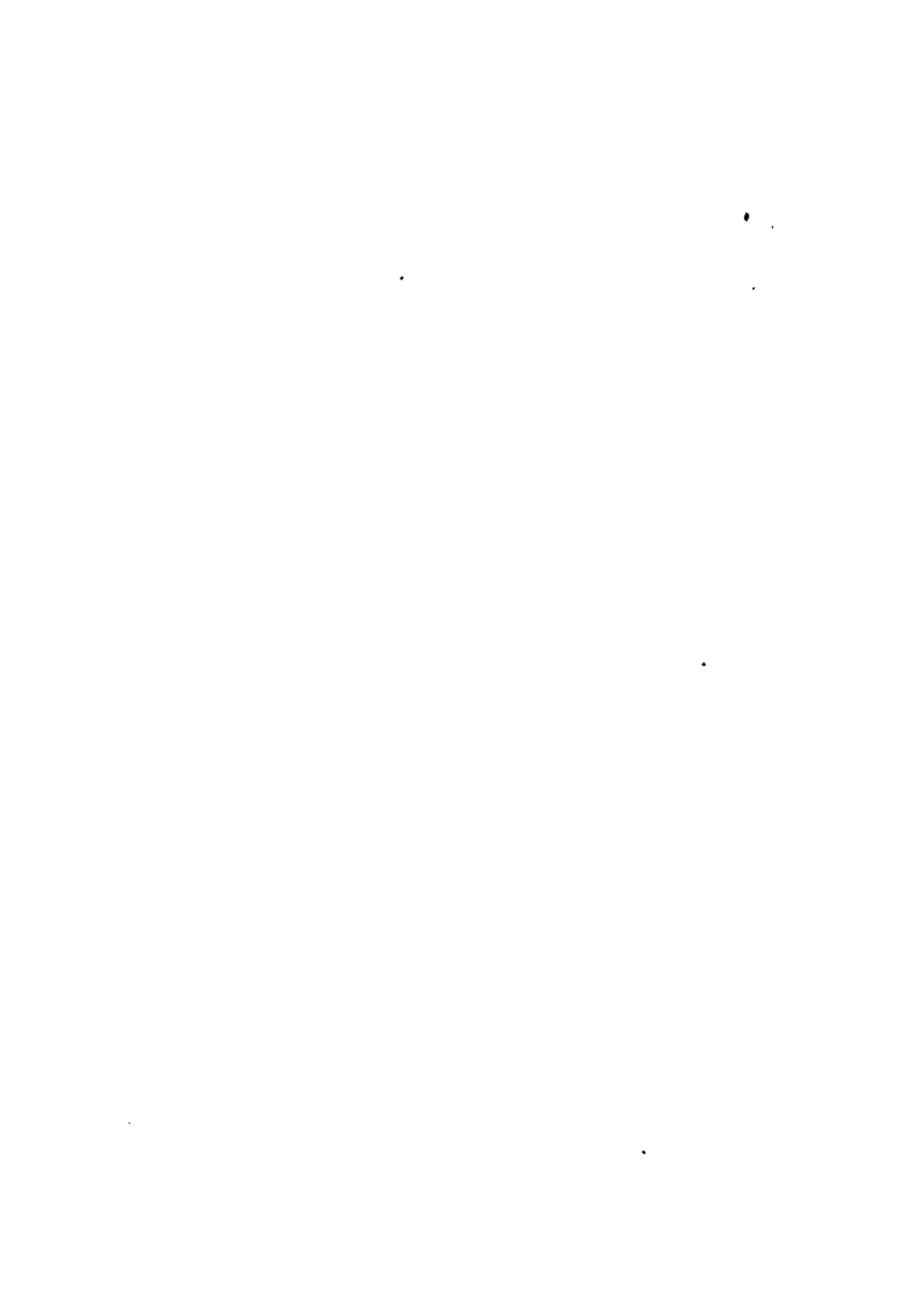
A ces deux raisons que l'on pourrait qualifier de conjoncturelles, s'ajoute un motif plus scientifique et fondamental : la compréhension du cycle des éléments dans le domaine supergène.

Un tel sujet recouvre des préoccupations variées parmi lesquelles la synthèse des sulfures de basse température, la formation des nodules de man-

(\*) CNRS, détaché au BRGM, Orléans.

(1) Boîte postale 6000, 45048 Orléans.

(2) La géomicrobiologie peut être confondue avec la bio-géochimie, dans le sens de Vernadsky, néanmoins, celle-ci couvre l'action de toute forme de vie sur la matière minérale, la géomicrobiologie celle de micro-organismes (bactéries, champignons, actinomycètes...). Certains auteurs ont traduit dans la littérature des termes à notre avis inutilisés tels que : microbial biogeochemistry (J. E. Zajac, 1960).



ganèse, l'altération des minéraux et des roches, la concentration ou la dispersion des métaux par la matière organique... Il ne faut pas sous-estimer l'importance pratique de ces études, que ce soit pour comprendre la genèse de certains types de gîtes métalliques, aider la prospection géochimique, lutter contre l'altération des monuments (maladie de la pierre)...

Ces différentes raisons expliquent que le Bureau de recherches géologiques et minières (B. R. G. M.) ait tenté de développer cette discipline. Cela fut possible grâce à l'aide procurée par la D. G. R. S. T. dès 1964 par le jeu d'une convention de recherches n° 63 FR 175, étalée de 1964 à 1968, et portant sur : « les transformations des minerais et des roches par l'action biologique dirigée du métabolisme de certains micro-organismes et des phénomènes physico-chimiques qu'il provoque ou accélère dans certaines conditions » (1).

Depuis 1964, s'est donc constitué au B. R. G. M. une équipe pluridisciplinaire où interviennent microbiologistes, biochimistes, géochimistes et minéralogistes, constituant un groupe d'études sur les relations entre minéraux et micro-organismes; cette équipe, originale au niveau national, est en contact avec les groupes étrangers analogues, tels que : le Baas Beeking Laboratory en Australie, Warren Spring Laboratory en Angleterre, le groupe de Vancouver (B. C.) au Canada, l'Institut Vernadsky à Moscou, le groupe de Baia Mare en Roumanie et en France avec des Instituts plus proches de l'agriculture tels que IBANA, INRA.

Avant de détailler les méthodes de travail, les problèmes abordés et les résultats obtenus, rappelons, brièvement certaines caractéristiques de la matière vivante.

#### A. — QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DE LA MATIÈRE VIVANTE.

##### 1. L'ubiquité.

Les micro-organismes sont omniprésents dans la biosphère, dans les sols, dans les eaux douces, dans les eaux de mer, dans les vases marines... Leur facile dissémination par le vent et par l'eau, leur pouvoir énorme d'adaptation à des milieux très divers expliquent cette omniprésence, et aussi leur abondance puisque l'on estime, par exemple, que les quinze premiers centimètres d'un sol fertile contiennent plus de 5 t de micro-organismes à l'hectare.

Les ensembles de micro-organismes différents — espèces, familles... — tels qu'ils résultent des travaux des biologistes sont loin d'être identiques, mais présentent, cependant, un certain nombre de

traits généraux tant au niveau de leur mode de vie, que de leur action sur leur micro-environnement :

a) l'élaboration du matériel cellulaire et l'énergie nécessaire à la vie nécessitent une source de carbone, d'azote, d'hydrogène... On distingue alors :

— les organismes *autotrophes* (chimioautotrophes) qui utilisent des sources de matériaux inorganiques ;

— les organismes *hétérotrophes* (chimio-organotrophes) qui utilisent des sources de matériaux organiques ;

b) la possibilité de se développer en présence d'oxygène : aérobiose, ou en l'absence d'oxygène : anaérobiose ;

c) on connaît des bactéries qui se développent dans des milieux à basse température, 4°C, bactéries *psychrophiles*, d'autres, au contraire, qui peuvent vivre jusqu'à des températures de 80°C, cellules *thermophiles*, des bactéries dites *barophiles* qui supportent des pressions de 0,200 kbar, des bactéries qui vivent dans des conditions de pH acides, d'autres au contraire qui sont mieux adaptées aux milieux basiques...

Ainsi, dans notre optique, la caractéristique essentielle de la matière vivante paraît être, outre son ubiquité, son potentiel chimique et énergétique vis-à-vis de l'environnement.

##### 2. Le potentiel chimique de la matière vivante.

La matière vivante, considérée sous l'angle chimique, présente un double aspect; c'est un stock d'éléments chimiques important et non lié; les éléments constitutifs essentiels de la matière vivante sont, en valeur moyenne :

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| O, H                   | supérieurs à 10 % |
| C, N, Ca               | 1 à 10 %          |
| S, P, Si, K            | 0,1 à 1 %         |
| Mg, Fe, Na, Cl, Al, Zn | 0,01 à 0,1 %      |
| Cu, Br, I, Mn          | 0,001 à 0,01 %    |

Il convient de souligner que ces valeurs ne traduisent pas la complexité chimique des constituants cellulaires : acides aminés, acides ribonucléiques, acide désoxyribonucléique, sucres... Ces valeurs ne font pas apparaître non plus que certaines espèces ont des teneurs beaucoup plus importantes en certains éléments : par exemple, on trouve dans certaines bactéries jusqu'à 7 % de Mn.

Si l'on compare, à la suite de W. Abbott (1971), la composition moyenne des organismes marins, par exemple, avec celle du milieu dans lesquels ils vivent, on met en évidence le pouvoir de concentration vis-à-vis de nombreux éléments de la matière protéidique (voir tableau ci-après).

Par voie de conséquence, la matière vivante peut donc modifier très nettement l'environnement naturel.

Schématiquement, on peut décrire un micro-organisme comme un système qui emprunte à l'extérieur les matériaux nécessaires à son énergie et à l'éla-

(1) Cette action concertée a été obtenue et réalisée grâce à l'appui de M. Keilling, professeur à l'Institut agronomique, directeur de l'IBANA. Son rôle comme conseiller scientifique est primordial et nous sommes heureux de lui marquer notre reconnaissance.

| ÉLÉMENTS    | CONCENTRATION            |                               |  |
|-------------|--------------------------|-------------------------------|--|
|             | dans l'eau de mer (mg/t) | dans les roches et sols (g/t) | dans les cendres d'organismes marins (g/t) |
| Or.....     | 0,4                      | 0,004                         | 0,12                                       |
| Argent....  | 0,3                      | 0,1                           | 100  |
| Bismuth...  | 0,4                      | 1                             | 3  |
| Cadmium..   | 0,12                     | 0,3                           | 4  |
| Cobalt....  | 0,5                      | 25                            | 50   |
| Chrom. ...  | 0,25                     | 100                           | 1 400                                      |
| Cuivre....  | 10                       | 50                            | 500  |
| Mercur. ... | 0,27                     | 0,4                           | 15   |
| Manganèse   | 10                       | 1 000                         | 600  |
| Nickel....  | 2                        | 75                            | 250  |
| Titane....  | 1                        | 6 000                         | 15 000                                     |
| Vanadium    | 2                        | 100                           | 4 700                                      |
| Uranium..   | 3                        | 4                             | 32   |

boration de son matériel cellulaire, et qui rejette à l'extérieur un ensemble de produits appelés métabolites, qui sont de véritables résidus.

Le micro-organisme fractionne les sources carbonées de poids moléculaire élevé et de forte énergie de son environnement, incorpore les petits dérivés dans la cellule, les dégrade dans des molécules encore plus petites, les transforme en aminoacides, nucléotides, vitamines, hydrates de carbone et acides gras et finalement construit avec ces matériaux les protéines, coenzymes, acides nucléiques, mucopolysaccharides et lipides. Des centaines d'enzymes doivent être construites et doivent agir d'une façon coordonnée pour éviter le chaos (Demain, 1972).

Les mécanismes de régulation en place permettent à une espèce de lutter avec efficacité avec d'autres formes de vie et de survivre dans la nature. Ces mécanismes de contrôle permettent la synthèse de certaines enzymes indispensables dans la proportion correcte, et ces mécanismes contrôlent l'action de ces enzymes. Une cellule ne produit donc pas des métabolites de façon indépendante de son environnement.

Cette action sur l'environnement peut revêtir deux formes :

— l'action directe, par le jeu du système enzymatique, qui permet aux micro-organismes d'élaborer le matériel cellulaire et de trouver son énergie en modifiant les paramètres du milieu extérieur ; on peut citer en exemple les bactéries sulfato-réductrices et les bactéries sulfo-oxydantes ;

— l'action indirecte des produits du métabolisme sur les matériaux environnants. Il convient de souligner l'importance des métabolites comme les acides aminés et les acides carboxyliques par l'intermédiaire de leurs propriétés chélatantes.

Il est maintenant possible, après avoir donné ces quelques caractères généraux, d'explicitier nos méthodes, et d'examiner les problèmes abordés.

## B. — LES MÉTHODES.

### 1. L'équipe.

Cette discipline, la géomicrobiologie, fait intervenir des connaissances dans des domaines variés, car il convient d'abord de résoudre des problèmes minéralogiques, métallogéniques, géochimiques... et il est indispensable que le microbiologiste qui va être le plus en contact avec les micro-organismes puisse suivre le résultat de son expérimentation et fasse donc appel à des chimistes, minéralogistes... Ainsi, ce travail ne peut être que celui d'un groupe multidisciplinaire où la microbiologie constitue l'outil indispensable appliqué à des problèmes variés.

Poser les problèmes, les suivre, tenter de les résoudre, de les interpréter, est un travail à dominante géochimique, adapter l'outil aux problèmes ne peut être qu'un travail de microbiologistes et de biochimistes.

### 2. Les méthodes.

La question majeure devant un problème posé est celui du choix du ou des micro-organismes à utiliser ; en effet, si la nature du problème — oxyder un sulfure, réduire un sulfate, mettre en solution des hydroxydes de fer... — permet généralement de déterminer à quelle famille s'adresser, au sein de cette famille quelle souche employer ?

Devant la grande ubiquité de la Vie, sa facilité d'adaptation à des milieux variés, il a semblé naturel de travailler avec une ou plusieurs souches déjà adaptées au problème posé, en employant une démarche de naturalistes, afin d'éviter le problème de l'adaptation des souches à un milieu nouveau. Par conséquent, des prélèvements en milieu stérile sont effectués directement sur le terrain, objet du problème à traiter, qui permettent de disposer d'un ensemble complexe de bactéries, actinomycètes, champignons...

Ces différents micro-organismes, par le jeu de l'adaptation naturelle au microclimat (température, humidité), à l'environnement local (matière organique, teneur en métaux toxiques...) constituent un ensemble de souches précieuses, dans lequel des souches actives sont sélectionnées.

Cette sélection se fait en plusieurs temps :

a) à l'aide de milieux cultures différenciés, on effectue l'isolement des micro-organismes par genre ;

b) l'isolement est suivi d'un travail de sélection, puis les souches isolées sont testées et confrontées au problème posé, les meilleures sont retenues pour une étude plus approfondie ; c'est par cette méthode que la collection de souches du B. K. G. M. a pu être créée (sélection par leur vitesse de réaction ou par le pH formé, ou par le nombre de cellules formées, etc.).

Les possibilités de travail au laboratoire sont essentiellement à deux échelles :

— petite échelle en utilisant des récipients type Erlenmeyer ;



— à plus grande échelle en utilisant des fermenteurs où il est possible sur un volume de 10 l, de contrôler les paramètres d'une fermentation : température, débit de gaz, alimentation, dénombrement de germes, agitation, pH, Etc... (fig. 1).

Au niveau minéralogique, le contrôle de la bio-réaction s'effectue par les examens d'analyse aux rayons X, de microscopie électronique à balayage, de mesure de surface spécifique. En outre, on est souvent amené dans certains cas, afin de comprendre

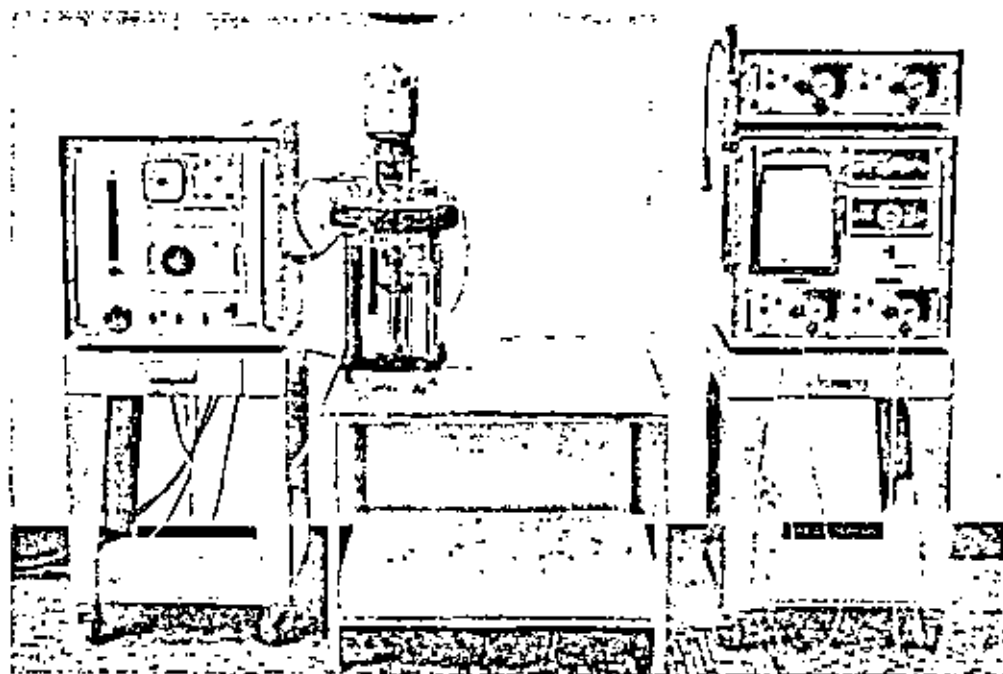


FIG. 1. — Vue d'ensemble d'un fermenteur.

Le contrôle de l'expérimentation s'effectue au niveau chimique par l'analyse des principaux constituants du système; ce contrôle est toutefois très délicat car, d'une part, certains éléments chimiques analysés, tels que Na, K, P... sont des constituants cellulaires et apparaissent dans le milieu de culture, ou en sont les éléments constitutifs et, à ce titre, sont partiellement recyclés par les micro-organismes jeunes. D'autre part, la séparation entre la phase minérale et les micro-organismes qui permettraient d'effectuer un bilan quantitatif de l'expérience est très délicat, voire impossible.

Afin de pallier ces inconvénients, on peut user de deux méthodes :

— éviter le contact direct entre le minéral et les micro-organismes en travaillant avec les produits de métabolisme; on élimine dans ces expériences les possibilités d'action enzymatique directe, mais surtout les actions de surface dont le rôle peut être très important;

— travailler avec des minéraux de synthèse à éléments marqués, ce qui permet de distinguer l'élément provenant du minéral de celui provenant du milieu de culture (2).

le mécanisme de l'action microbiologique, à identifier et quantifier les métabolites; la chromatographie en phase gazeuse, la colorimétrie, l'évaluation de l'activité enzymatique sont alors utilisées.

### C. — LES PROBLÈMES ABORDÉS.

Les problèmes sur lesquels nous travaillons concernent essentiellement : l'altération des silicates, le cycle du fer et du manganèse, le cycle du soufre.

Dans ces problèmes, notre attention se concentre plus sur les résultats de l'action des micro-organismes, que sur l'examen biochimique des mécanismes de cette action. Signalons toutefois que cette distinction est parfois délicate.

#### 1. Les minéraux silicatés.

L'altération des matériaux silicatés est un problème majeur, tant pour la connaissance des cycles exogènes de la silice, de l'alumine, du fer, des alcalins... que pour les conséquences dans le domaine agricole en particulier; les traités récents sur l'altération (Loughnan, 1969) s'occupent avant tout de l'aspect chimique, l'action primordiale de la vie ne trouvant que lentement accès à la littérature.

(2) Nous sommes heureux de pouvoir remercier M. ROUS, du Centre de synthèse et de chimie des minéraux du C. N. R. S. (Dir. G. Sabatier), qui nous a préparé des feldspaths marqués.



Il faut toutefois mentionner les constats sur le rôle de la microflore dans les sols (Winogradski, 1926; Waksman, 1927) et surtout les travaux de l'agronome russe V. G. Aleksandrov (1946, 1949, 1950...) sur le problème des bactéries des silicates : organismes du sol capables de décomposer les minéraux aluminosilicatés et de libérer ainsi le potassium, ces micro-organismes ont donné lieu par la suite à de nombreux travaux (Tesić et Todorovic, 1958; Heinen, 1960, 1963, 1967; Gugalski *et al.*, 1973).

Heinen, en particulier, constate que ce type d'organisme incorpore le silicium à la place du phosphore dans son matériel cellulaire. Indépendamment de ces organismes, il convient de mentionner les études de Jacks (1953) sur l'influence des produits de dégradation de la matière organique sur les silicatés, de Neher et Kohrer (1958) sur la dégradation biologique des roches gneissiques et la formation de dolomie, Oberlier et Zlatanovic (1964) sur la biodétérioration des granites en Yougoslavie, Wagner (1965) et Wagner et Schwartz (1967) sur la biodétérioration de différents minéraux du granite en présence d'une microflore hétérotrophe, en détaillant le rôle de l'acide oxalique, Silverman et Munoz (1970) examinaient le rôle des champignons sur la destruction de roches silicatées variées.

Les travaux que nous avons effectués dans ce domaine ont porté sur :

- la libération du potassium de la muscovite ;
- l'altération de matériel feldspathique complexe ;
- la biocorrosion de l'olivine.

### 1.1. La libération du potassium de la muscovite (Goni *et al.*, 1973).

L'objectif de cette étude est de provoquer par bioaltération l'extraction du potassium du réseau. Cette altération a été effectuée comparativement par des bactéries de collection, telles que *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Escherichia freundii*, des bactéries isolées des sols, et un champignon très fréquent dans les sols, l'*Aspergillus niger*.

L'influence de différents paramètres sur l'extraction du potassium a été suivie : taux de renouvellement du milieu de culture, aération, nombre d'organismes...

L'extraction optimale atteint 27 % du potassium original du mica avec l'*Aspergillus niger*.

### 1.2. L'altération des feldspaths.

L'expérimentation que nous avons conduite s'est attachée à provoquer la biocorrosion d'un matériel feldspathique comprenant essentiellement du microcline, et des plagioclases en voie de séricitisation.

Les essais ont été réalisés avec des souches provenant des collections du B. R. G. M., *Aspergillus niger* en particulier et des champignons, bactéries

et actinomycètes isolées et sélectionnées selon les méthodes décrites précédemment.

Le contrôle expérimental s'effectue par l'analyse de la chimie des solutions, par mesure de la surface spécifique développée sur le matériel, et par examen morphologique en microscopie électronique à balayage.

Les principaux résultats auxquels nous avons abouti sont les suivants :

— la mise en solution des éléments majeurs (Al, Na, K) est très faible et reste inférieure au pour-cent ;

— la corrosion par voie chimique, faite en utilisant des réactifs analogues aux métabolites produits, montre que la mise en solution des éléments est plus rapide pour le potassium et le sodium que pour l'alumine (solubilisation incongruente) ;

— la corrosion par voie microbiologique s'accompagne de modifications morphologiques du matériel, comme il ressort de l'étude faite au MEB (fig. 2 à 7) où la même zone est représentée avant et après attaque ;

— la corrosion par voie chimique utilisant des réactifs analogues aux métabolites aboutit à une augmentation très importante de la surface spécifique qui, dans certains cas, peut être multipliée par 8.

Afin de préciser ces premières observations, une série d'expériences a été entreprise sur deux autres feldspaths : albite et orthose ; les travaux réalisés (Lelen *et al.*, 1973) par attaque directe avec *Aspergillus niger* et par attaque chimique comparée utilisant l'acide oxalique, mettent en évidence :

— la différence de comportement de ces deux minéraux : l'albite s'altère de manière lente et régulière, et la mise en solution des éléments s'accompagne d'une diminution de la surface spécifique ; l'orthose s'altère de manière plus rapide et incongruente, ce qui aboutit à la surface du minéral à une zone enrichie en silice. La question de l'éventuelle néoformation d'argiles est posée dans ce cas ;

— l'altération de l'albite effectivement provoquée par *A. niger* est mise en évidence par des expériences utilisant de l'albite de synthèse réalisée avec du sodium marqué.

### 1.3. La biocorrosion de l'olivine.

De l'olivine naturelle provenant des nodules de basaltes de la région de Smci (Tchécoslovaquie) a été altérée avec le filtrat d'une culture d'*Aspergillus niger*, obtenu après 7 j d'incubation ; le détail de la méthode a été donné antérieurement (3) (collectif département LAB, B. R. G. M., 1971) ; on aboutit à une solubilisation de 60 % du fer et du magnésium contenu en 15 j d'attaque. Le

(3) La roche est broyée, tamisée, triée par élutriation et séchée en étuve à 103°C. 100 mg d'une granulométrie 0,15-0,25 mm sont prélevés, mis en Erlenmeyer de 250 et stérilisés à sec à 180°C.

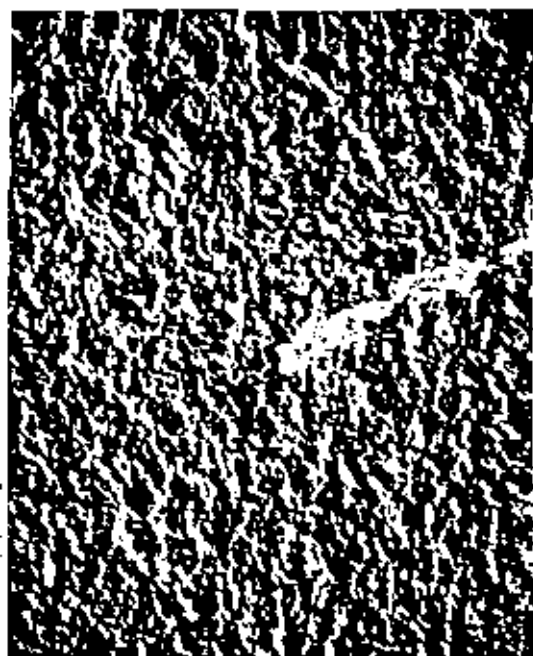


FIG. 3. — Cu 32, X 100, avant attaque.



FIG. 4. — Cu 32, avant attaque, X 3000.



FIG. 5. — Avant attaque, X 1000.

FIG. 2, 3, 4. — Biorrosion de matériel feldspathique à différents grossissements.

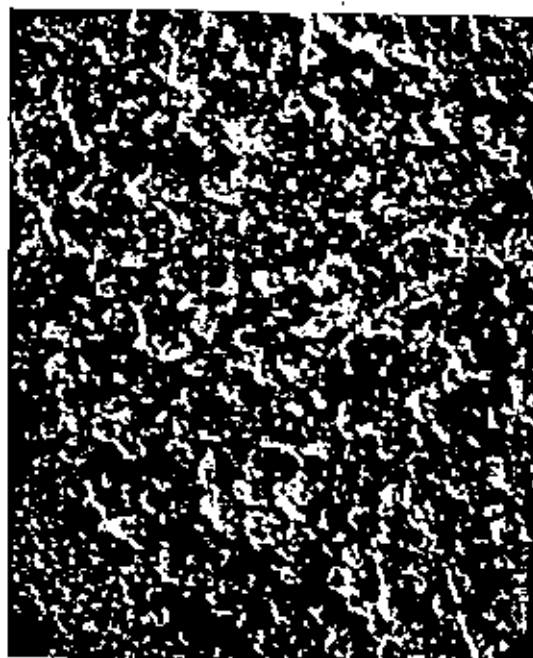


FIG. 5. —  $\times 100$ , après attaque.



FIG. 7. — Après attaque 4,  $\times 3000$ .



FIG. 6. — Après attaque,  $\times 1000$ .

FIG. 5, 6, 7. — Blococorrosion de matériel feldspathique à différents grossissements.

dosage de l'acidité oxalique et de l'acidité totale dans le filtrat a permis de reconstituer un milieu chimique « artificiel » semblable et d'effectuer une attaque. Les résultats sont très voisins, mettant en évidence que l'action indirecte de l'*Aspergillus niger* sur les minéraux est par l'intermédiaire de ses produits de métabolisme.

## 2. Les cycles du fer et du manganèse.

On ne peut parler du cycle de ces métaux sans souligner le paramètre fondamental qu'est leur degré d'oxydation. En effet, pour ces deux éléments, les formes réduites ( $Fe^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ) permettent la mobilisation, alors que les formes oxydées, sauf en condition de pH très acides, sont synonymes de blocage et de précipitation.

Indépendamment de cet aspect, force est de constater que les tentatives d'explication par voie purement chimique des processus faisant intervenir ces éléments dans la biosphère sont bien peu convaincantes.

Prenons, par exemple, la formation des nodules de manganèse : un raisonnement de cinétique chimique aboutit à un résultat sur la vitesse de formation en contradiction totale avec les faits d'observation.

On est ainsi amené à regarder les cycles du fer et du manganèse dans une perspective biotique ; ce que firent C. G. Ehrenberg, M. S. Winogradsky, G. Bertrand respectivement dès 1836, 1883 et 1905.

Nous distinguerons dans le cycle principal de ces éléments deux bio-sous-cycles, ceux de la réduction et de l'oxydation.

### 2.1. La réduction des composés oxydés du fer et du manganèse.

La mise en évidence de bactéries réduisant le fer et le manganèse résulte des premières observations (Halvorson *et al.*, 1927) reprises et complétées par la suite (Bronfield, 1958).

La réduction du fer et du manganèse peut être réalisée avec un assez grand nombre de bactéries, parmi lesquelles principalement : *Bacillus circulans*, *Bacillus polymyxa*, *Micrococcus lactilyticus* qui peuvent réduire un grand nombre de métaux (Woolfolk *et al.*, 1962).

Il s'agit d'organismes hétérotrophes et aérobiques qui utilisent pour ces réductions enzymatiques, des substrats organiques comme les hydrates de carbone.

Ces organismes sont intéressants car ils permettent de mobiliser le fer bloqué sous une forme oxydée et, éventuellement, de purifier certaines matières premières pénalisées par des teneurs en fer. Indépendamment de ces bactéries, on peut penser utiliser pour résoudre le même problème, des champignons qui agiront alors par leurs métabolites chélatants.

### 2.2. L'oxydation des composés réduits du fer et du manganèse.

L'oxydation biologique du manganèse a été mise en évidence par N. W. Beijerinck dès 1913 ; cet auteur démontre que des bactéries et champignons isolés des sols peuvent transformer le carbonate de manganèse,  $MnCO_3$  en oxydes  $Mn_2O_3$ . Par la suite, des travaux variés s'attachèrent à ces organismes, toutefois, la difficulté de leur étude tient à leur morphologie variable et nécessite la mise au point de techniques d'observations particulières (Perbl'ev *et al.*, 1964). Ainsi, depuis la description par ces auteurs du type de B. métallogenium, on retient la classification suivante :

— bactéries filamenteuses ou chlamydo-bactériales,

— bactéries pédiculées ou gallionella,

— bactéries unicellulaires.

Ces bactéries travaillent en aérobie, et le problème de leur autotrophie est encore sujet de discussion.

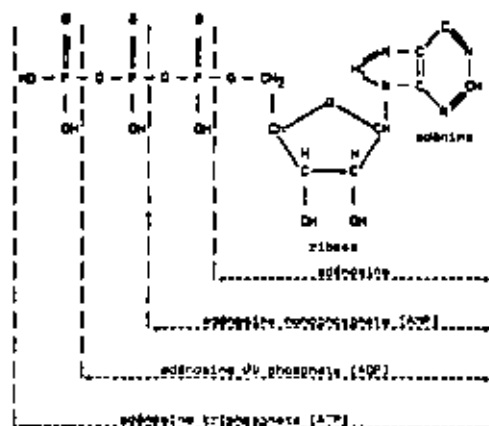
Indépendamment de ces bactéries, on connaît des bactéries oxydantes travaillant en anaérobiose, telles que *Sporovibrio ferrooxydans*.

Ces organismes ont été isolés de milieux variés : sols, vases lacustres, océans. Leur rôle dans le problème de la genèse des nodules de manganèse a été reconnu. En effet, la vitesse d'oxydation de  $Mn^{+2}$  par voie purement chimique est lente et la vitesse de croissance des nodules a été estimée à 1 mm par millier d'années. Ce résultat est en totale opposition avec celui observé sur des nodules formés autour de débris divers dont la date d'immersion est très récente. Le rôle des bactéries qui catalysent l'oxydation du manganèse est alors fondamental (Ehrlich, 1963, 1970).

Pour comprendre cette activité, il est indispensable d'explicitier un peu le métabolisme microbien.

Les oxydations biologiques fournissent l'énergie nécessaire pour la survie et la croissance des organismes. Pasteur fut le premier à comprendre que la dégradation des composés organiques, en l'absence d'oxygène, pouvait également constituer la source d'énergie indispensable à la formation de composants chimiques cellulaires, protéines, hydrates de carbone ayant un contenu énergétique supérieur à celui des aliments dont ils dérivent.

Dans ces mécanismes complexes, l'ATP adénosine tri-phosphate est le maillon indispensable dont la réaction d'hydrolyse permet la conservation d'une partie de l'énergie libérée et son transfert sous forme d'ADP ou d'AMP sur des molécules acceptrices qui se trouvent activées par ce processus est susceptible, en présence des enzymes de biosynthèse appropriées, de s'assembler en macromolécules : le glucose donne l'amidon, les amino-acides des protéines...



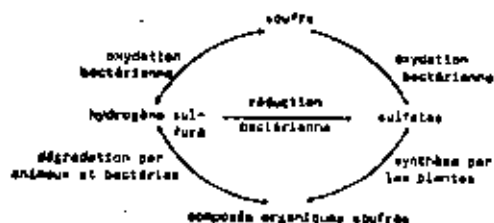
L'ATP étant consommée, l'une des principales fonctions du métabolisme est la régénération de l'ATP à partir de ses produits d'hydrolyse. C'est le rôle essentiel de la photosynthèse, de la respiration ou de la fermentation.

Dans le cas des bactéries sulfato-réductrices, l'atome de soufre est l'accepteur d'électrons indispensable à l'oxydation de substrats organiques producteurs de l'énergie nécessaire à la régénération de l'ATP.

### 3. Le cycle du soufre.

L'importance des sulfures dans le domaine minier constitue la raison première de l'intérêt porté par le B. R. G. M., après bien d'autres organismes de recherches, aux micro-organismes du cycle du soufre.

D'une manière très schématique, on peut représenter le cycle du soufre dans la biosphère par le schéma suivant :



Dans la matière organique vivante, le soufre est essentiellement sous forme réduite, par contre la source de soufre, pour les plantes en particulier, la plus fréquente est une forme oxydée : le sulfate. On est ainsi amené à distinguer les micro-organismes réducteurs et les micro-organismes oxydants.

#### 3.1. La formation d' $H_2S$ à partir des sulfates : les bactéries sulfato-réductrices.

La réduction biologique des sulfates en sulfures a été démontrée, en 1893, par Murray et Irvine, et l'on doit à Beijerinck d'avoir isolé les organismes responsables de cette réduction. C'est Baars qui,

en 1930, formula la nomenclature concernant ces bactéries.

Par les recherches de biochimistes qui préféraient les chaînes métaboliques (Postgate, en particulier) et des géochimistes soucieux de comprendre les mécanismes de formation des sulfures à basse température, l'on dispose maintenant d'une assez bonne connaissance de ces bactéries anaérobies et de la chaîne de réactions qui mènent des sulfates aux sulfures.

Ainsi, à partir d'une source de carbone et d'hydrogène, noté CR, l'action de ces bactéries sur le milieu extérieur peut être représentée par une réaction telle que :



Ces bactéries ont donné lieu à des travaux des biochimistes, dans le but de mieux comprendre la genèse des sulfures synsédimentaires : (Temple *et al.*, 1964 ; Lambert *et al.*, 1970 ; Rickard, 1969 ; Hallberg, 1972).

Pour notre part, nous avons limité ces expériences, dans ce domaine, à deux cas particuliers :

#### 3.1.1. La biosynthèse de la galène (Lelen *et al.*, 1973).

Cette synthèse a été réalisée en mettant en contact une solution ionique de plomb avec les métabolites gazeux d'une culture de bactéries sulfato-réductrices. Ces expériences permettent de rendre compte des structures stalactiformes de galène trouvées dans certains gisements à caractère karstique (fig. 8).

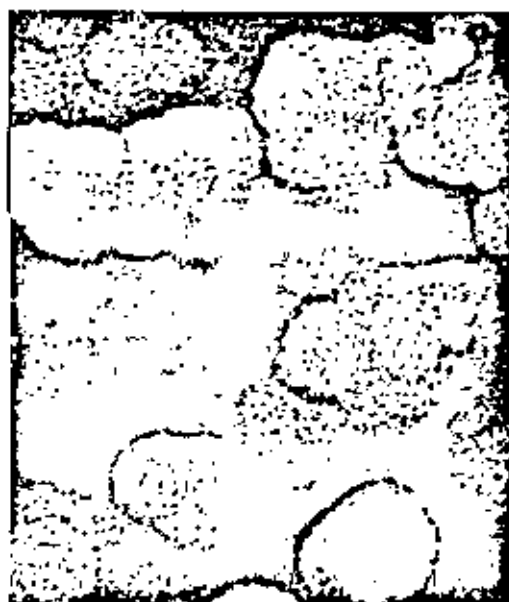


G x 6 000.

FIG. 8. — Galène de biosynthèse, M. E. B.

### 3.1.2. La biosynthèse de la wurtzite (Goni *et al.*, 1973).

La wurtzite a été obtenue dans des conditions analogues à celles décrites pour la galène, en utilisant une solution de sulfate de zinc.



G x 6000.

Fig. 9. — Wurtzite de biosynthèse, M. E. B.

Nous avons pu montrer un fait très curieux : ces bactéries peuvent se développer dans un milieu où la teneur en zinc était de  $10^{-2}$  moles par litre, avec comme seule source de sulfate, le sulfate de zinc.

La formation de wurtzite, forme instable du sulfure de zinc à la température ordinaire ne dépend pas de la teneur en  $S^{2-}$ , mais paraît être en relation avec la vitesse de formation (fig. 9).

### 3.1.3. La réduction du gypse et la lutte contre la pollution.

L'utilisation de ces bactéries à des fins industrielles peut viser des objectifs distincts et complémentaires :

- la production de soufre à partir de sulfates naturels tels que le gypse, par exemple,

- l'élimination de matière organique polluante utilisée comme source de carbone par ces bactéries.

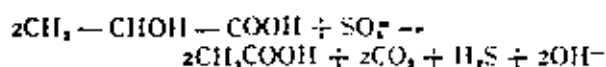
Nos études, dans ce domaine, sont parties du premier de ces objectifs pour s'orienter *in fine* et dériver vers le second.

Dans ce type de respiration anaérobie, les oxydations anaérobies des substrats organiques sont toujours incomplètes et conduisent à l'accumulation d'acide acétique comme produit terminal, ce qui traduit apparemment l'incapacité de ces

organismes à oxyder l'acide acétique par l'intermédiaire du cycle citrique. L'importance de cette remarque apparaîtra dans le développement de nos propres travaux.

Parmi les substrats carbonés susceptibles d'être utilisés, le lactate est la molécule permettant d'atteindre les rapports optimaux de réduction.

Suivant la réaction théorique suivante :



Le développement ci-dessous permet de comprendre la démarche suivie dans le cadre de la production du soufre à partir du gypse.

#### Réduction du gypse.

Dans un souci de production de soufre ayant un caractère économique, il est nécessaire de rechercher des matières premières présentant peu de valeur marchande.

Pour les sulfates, le problème ne se pose pas. Ceux-ci constituent souvent un déchet dont il est souhaitable de se débarrasser dans le cadre d'une politique industrielle pouvant être compatible avec le maintien de l'environnement.

#### Matières organiques.

Il a été précisé que le lactate était la molécule organique permettant un rendement optimal.

Cette matière première ne se trouve pas directement dans la nature. Par contre, de nombreux déchets : lactosérum, mélasses, amidons, provenant d'une activité industrielle primaire, peuvent donner après une fermentation adéquate l'acide lactique indispensable.

Par conséquent, la première phase de nos recherches a eu pour but de rechercher des matières de déchets fermentescibles susceptibles de fournir à bas prix le substrat lactique et dans des conditions optimales en fonction du pays : industrie sucrière ou laitière importante, utilisation de ces sous-produits sur le marché.

#### Réduction des sulfates.

Cette recherche sur la productivité des bactéries sulfato-réductrices a tenu compte de nombreux paramètres : température, granulométrie, apport de matières organiques et minérales complémentaires, azote, phosphore, oligo-éléments (fer nécessaire à la synthèse du cytochrome 3, enzyme indispensable) pourcentage d'utilisation du lactate, produits du métabolisme inhibants (dégagement de  $\text{CO}_2$  générateur de carbonate recouvrant les grains de sulfate et bloquant l'activité des bactéries), produits pénalisants (biomasse microbienne, déchets du métabolisme tels que l'acétate) qu'il est souhaitable d'éliminer pour obtenir un effluent propre. Ce qui constitue le troisième point essentiel.

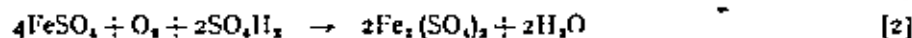
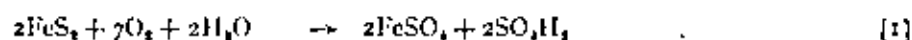


*Effluent propre.*

Il s'agit essentiellement de réduire la pollution en éliminant la biomasse bactérienne et l'acide acétique.

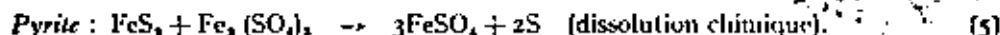
Celle-ci est réalisée par un deuxième étage de fermentation anaérobie (méthanobactères) permettant de transformer l'acide acétique en méthane. Cette épuration en fermentation anaérobie fournit du méthane dont l'énergie calorifique et mécanique est mise à profit dans le développement du processus global.

Toute source de sulfate soluble pouvant être utilisée, comme nos expériences l'ont montré : « phosphogypse » (résidu de la production des superphosphates,  $\text{SO}_7$  de désulfuration des pétroles, etc. Il est possible de concevoir la production ( $\text{H}_2\text{S}$ ) comme un moyen d'épuration, d'élimination



de nombreux produits sulfatés pour la plupart plus ou moins solubles, donc très pénalisants dans l'environnement.

Cependant, selon N. W. Le Roux, A. A. North, J. C. Wilson, la dissolution dans le cas de la pyrite pourrait être schématisée ainsi :



### 3.2. L'oxydation des composés réduits du soufre : la biolixiviation des sulfures.

Il s'agit d'un sujet d'une grande importance économique, qui explique les très nombreux travaux qui lui sont consacrés et l'abondante bibliographie existante. Ces études toutefois, dont le caractère appliqué est prépondérant, laissent dans l'ombre la connaissance biochimique du métabolisme qui est essentiel pour maîtriser l'application.

Les bactéries les plus fréquemment utilisées pour la lixiviation des sulfures appartiennent aux genres des thiobactériacées. Ces bactéries non sporulantes, autotrophes, aérobies sont capables d'oxyder les sulfures, le soufre et les thiosulfates en sulfates.

Les classifications (Trudinger, 1967) font apparaître dans ce genre différentes familles telles que *T. thioaratus*, *T. thiooxydans*, *T. ferrooxydans*, *T. novellus*, *T. concretivorus*... et signalent que cette classification est peu satisfaisante, aussi on peut d'une manière schématique distinguer trois grands types :

— *T. thioaratus*, qui oxyde le soufre dans des conditions de pH neutre ou basique.

— *T. thiooxydans*, qui oxyde le soufre en milieu acide (pH = 2).

— *T. ferrooxydans* qui oxyde le soufre et le fer en milieu acide (pH = 2).

Les *T. ferrooxydans*, bactéries les plus utilisées en biolixiviation, utilisent dans des conditions autotrophes le carbone du  $\text{CO}_2$  atmosphérique à la synthèse des molécules organiques nécessaires à leur croissance.

L'oxydation du fer ferreux ou du soufre fournissant l'énergie nécessaire à la régénération de l'ATP et de la DPNH (ou TPNH) indispensable de son côté à la conversion du  $\text{CO}_2$  en matière cellulaire (4).

Si le substrat est formé par de la pyrite, parmi le jeu de réactions qui peuvent intervenir, il est difficile de déterminer exactement celles d'origine biochimique :

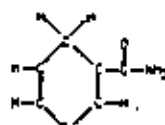
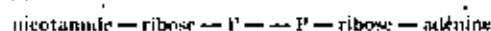
Les produits de cette réaction : fer ferreux serait oxydé suivant la réaction [2] (action microbienne), et l'oxydation du soufre suivant la réaction [4] (action bactérienne).

L'action bactérienne complétant ainsi une oxydation chimique initiale, puise dans les réactions [2] et [4] l'énergie nécessaire à sa croissance. Ces réactions sont indispensables à la continuation de l'attaque car, sans elles, l'action chimique se trouverait rapidement inhibée par le développement

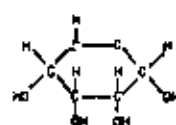
#### (1) DPNH et TPNH :

Ce sont des molécules relativement complexes comprenant une molécule niantamide, un dérivé de la pyridine, et une molécule d'aldémine portant chacune une molécule d'un sucre en C<sub>5</sub>, le ribose, et liées par ces derniers à des groupements phosphate.

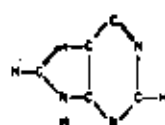
Soit :



NICOTAMIDE



RIBOSE



ALDÉMINE

d'un film élémentaire de soufre à la surface des grains et la consommation du sulfate ferrique, ce qui pourrait également expliquer l'action des tensio-actifs. L'abaissement de la tension superficielle favorisant la dispersion du soufre colloïdal formé dans un premier temps.

L'étude des bactéries *T. ferrooxydans* a donné lieu à de très nombreux travaux ; parmi ceux-ci, on peut distinguer :

— les recherches sur le milieu de culture : en particulier sur le rôle des phosphates, de la concentration en fer ferrique, du pH du CO<sub>2</sub> (Napier *et al.*, 1967 ; Leroux *et al.*, 1973) ;

— les recherches sur l'oxydation simultanée du fer et du soufre et sur la biochimie des mécanismes (Duncan *et al.*, 1967 ; Korczynski *et al.*, 1968 ; Agate *et al.*, 1970 ; Trudinger) ;

— les recherches sur l'inhibition par les métaux lourds (Thuovinen *et al.*, 1971) ;

— les travaux portant sur les minéraux à lixivier, leur granulométrie, perméabilité, et leur nature (Malouf *et al.*, 1961 ; Nielsen *et al.*, 1972...).

Ainsi, les sulfures dont la biolixiviation a déjà été réalisée, ne serait-ce qu'à l'échelle du laboratoire, sont : chalcosite, covellite, chalcopyrite, bornite, pyrite, galène, millérite, sphalérite. Selon les réactions :

en continu (exprimée en cuivre métal) par jour, pour cette seule mine, par biolixiviation est de 150 t, sur un « minerai » considéré, il y a peu d'années, comme intraitable. Pour lixivier ces énormes tas, il faut utiliser (et recycler) des volumes énormes de solution acide, de l'ordre de 240 000 m<sup>3</sup>/j ; fait curieux, la granulométrie, quelconque à l'origine, diminue au fur et à mesure que la lixiviation se produit, et cela est dû à l'éclatement des blocs et des grosses particules par un effet simultané d'augmentation de volume et de la température surtout aux réactions 1-4.

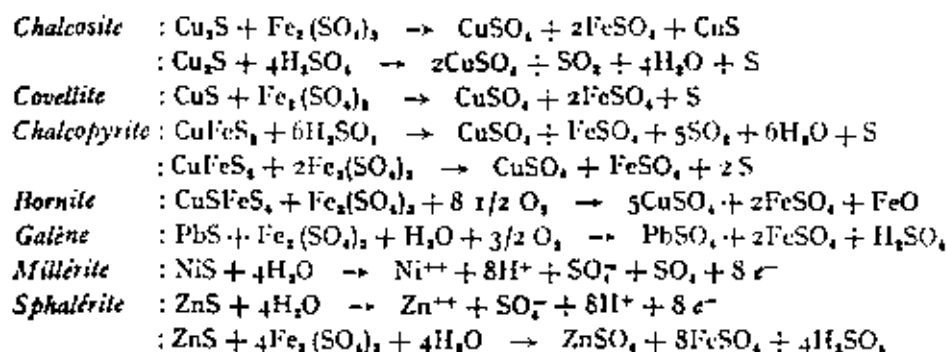
Nos travaux se situent actuellement à l'échelle du laboratoire, et ont porté sur :

— l'aptitude des bactéries *T. ferrooxydans* à oxyder les sulfures, le soufre élémentaire et les thiosulfates ;

— la tolérance de *T. ferrooxydans* vis-à-vis des métaux lourds tels que le cuivre, le zinc, le plomb, le fer et l'arsenic. Les souches ont été adaptées à des teneurs supérieures à 10 g/l pour le cuivre et le zinc, et à des teneurs de 100 à 300 mg/l pour l'arsenic. En ce qui concerne le plomb, la teneur limite était réglée par la solubilité du sulfate ;

— la mise en solution de la pyrite, de la chalcopyrite et de la covellite.

Ces essais ont permis de montrer que la tolérance



La lixiviation sur le terrain est déjà réalisée à l'échelle industrielle dans quelques mines et, entre autres, à la mine de Bingham, à Salt Lake City (Utah) par la société Kennecott Copper Corporation (fig. 10, 11).

Cette usine, la plus grosse exploitation à ciel ouvert du monde, extrait 110 000 t/j d'un minerai à 0,7 % de cuivre et 400 g/t de molybdène, ce qui entraîne l'extraction d'un « minerai » pauvre à 0,2 % de moyenne, à la cadence de 250 000 t/j. Ce sont ces rejets qui sont biolixiviés par une solution aqueuse d'acide sulfurique (dont le rôle est de maintenir le pH à la base des tas à 2,5 pour empêcher l'hydrolyse du sulfate ferrique). Le minerai est naturellement contaminé par le *T. ferrooxydans* (10<sup>7</sup> germes par gramme de rejet). La production

acquise se conservait même après repiquages successifs sur des milieux sans métaux.

Ces premiers essais sont maintenant l'objet de développement, avec pour objectifs essentiels : la lixiviation de minerais variés de cuivre et l'étude de problèmes généraux ou spécifiques dont l'incidence sur le rendement de la lixiviation est reconnue. Ils concernent essentiellement le rendement optimal d'une culture et ceux-ci sont fonction :

— pour la liqueur de percolation : du pH, de la concentration en fer ferrique, en substances nutritives, activité bactérienne ;

— pour le minerai : de la densité de la pulpe, de la granulométrie, de la texture du grain, de la minéralogie, des éléments traces pouvant jouer le rôle d'accélérateur ou inhibiteur, des phénomènes

The following table shows the results of the experiment. The first column is the number of trials, the second column is the number of correct responses, and the third column is the percentage of correct responses. The fourth column is the number of trials that were not completed.

| Number of trials | Number of correct responses | Percentage of correct responses | Number of trials not completed |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 10               | 8                           | 80%                             | 2                              |
| 20               | 15                          | 75%                             | 5                              |
| 30               | 22                          | 73%                             | 8                              |
| 40               | 28                          | 70%                             | 12                             |
| 50               | 35                          | 70%                             | 15                             |
| 60               | 42                          | 70%                             | 18                             |
| 70               | 48                          | 69%                             | 22                             |
| 80               | 55                          | 69%                             | 25                             |
| 90               | 62                          | 69%                             | 28                             |
| 100              | 70                          | 70%                             | 30                             |

The results show that the percentage of correct responses is relatively stable, ranging from 70% to 80%. The number of trials not completed increases as the number of trials increases, suggesting that the task becomes more difficult as the number of trials increases.



FIG. 10. — Vue d'ensemble du talus de lixiviation, mine de Bingham.

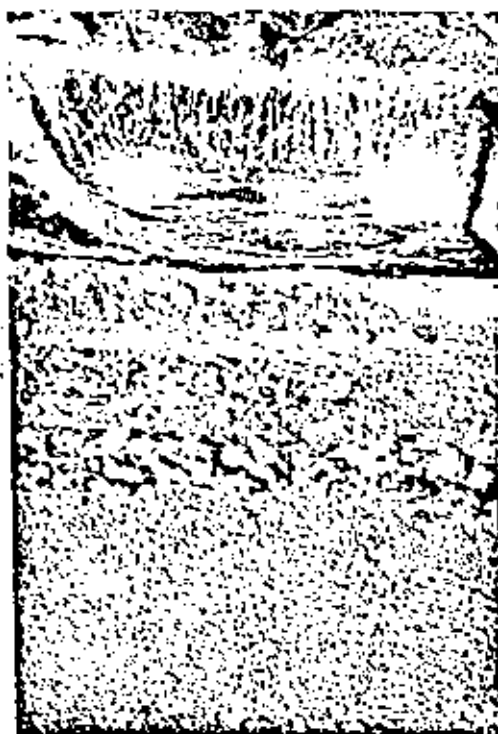


FIG. 11. — Mine de Bingham, liqueur de percolation.

de surface qui interviennent dans la répartition des bactéries libres dans la phase liquide ou attachées au solide.

#### CONCLUSION.

Les très nombreux travaux publiés, surtout depuis une quinzaine d'années, montrent l'intérêt croissant accordé à l'action de la vie, au sens le plus large, sur le minéral.

La compréhension de certains cycles géochimiques dans le domaine du supergène et son application à la valorisation de nombreux minerais pauvres ou réfractaires au traitement classique justifient l'intérêt actuel de la géomicrobiologie.

Il est certain que les difficultés sont énormes dans le domaine de l'application, étant donné la nature des phénomènes, leur complexité, la succession des systèmes vitaux encore incompris ou non maîtrisés. Il est certain, aussi, que ces difficultés ne doivent pas être à l'origine d'un blocage — même pour les esprits dits « appliqués » — qui ne se justifie pas. Une preuve en est donnée par le programme d'investigation américain au sujet des enzymes : jusqu'à ce jour, l'action enzymatique était utilisée à partir de leur production par les micro-organismes dans un milieu de culture, le mieux adapté possible. Maintenant, on oriente les recherches en considérant les enzymes comme les catalyseurs régénérables, qu'il doit être possible de fixer sur un support, afin de s'affranchir du système lent et délicat de la culture bactérienne, pour obtenir enfin une activité contrôlée, constante, qui n'est jamais — ou très rarement — réalisée au cours du développement discontinu des cultures sur milieu nutritif. Du point de vue minéralogique et géochimique, l'interaction du minéral-micro-organismes est aussi très peu connue ; on constate, par exemple, qu'il y a des chalcopyrites qui « réagissent » bien, c'est-à-dire qu'on obtient un bon rendement d'extraction du cuivre, et par contre, d'autres chalcopyrites sont « réfractaires », le taux de biocorrosion étant presque nul.

Quels sont les facteurs chimiques (rôle catalytique ou inhibiteurs des impuretés, inclusions, effet de la matière organique, de la mouillabilité, etc.) et/ou physiques (défauts de surface, porosité, sur-

face interne, texture...) qui ont défini cette réactivité différentielle ?

La collaboration de cristallographes et de physiciens du solide avec des microbiologistes et biochimistes serait précieuse pour faire avancer la connaissance de certains mécanismes vitaux sur le minéral, sans laquelle l'application à la minéralurgie des micro-organismes sera d'un empirisme

condamné d'avance à l'échec et, ce qui est peut-être plus grave, cet échec condamnerait aussi une voie de traitement de minerais pauvres, aujourd'hui marginaux, qui seront d'ici quelques générations les seuls disponibles.

Manuscrit reçu le 17 octobre 1973.

Accepté pour publication le 20 octobre 1973.

## BIBLIOGRAPHIE

### ASPECTS GÉNÉRAUX.

- ABBOTT, W. (1971). — Metallurgical mariculture, fiction or fore-sight? *Ocean Industry*, June 1971.
- POCHON, J. et DE BARJAC, H. (1958). — *Traité de microbiologie des sols*, Paris, Dunod.
- STAMIER, R. Y., DOUDOROFF, M. et ADLBERG, E. A. (1966). — *Microbiologie générale*, Paris, Masson.
- VERNAISKY, W. (1924). — La géochimie.
- WINOGRADSKI (1898). — *Botan Zeitung*, 13, p. 291.
- ZAJIC, J. E. (1969). — *Microbial biogeochemistry*, NY, London, Academic Press, 345 p.
- DEMAIN, A. (1972). — *J. appl. Biotechnol.*, 22, p. 345-362.

### L'ALTÉRATION DES SILICATES.

- ALEKSANDROV, V. G. (1946). — Altération des silicates et leur rôle dans l'accumulation de potassium par les plantes. Rés. communications 5<sup>e</sup> Conférence Sci. Inst. Agric. Kujbyshchv.
- ALEKSANDROV, V. G. (1949). — *Izvest. Akad. Sel'skhoz. Nauk S. S. S. R.*, 12, 12-19 (trad. S. I. G. n° 3005).
- ALEKSANDROV, V. G. (1949). — *Dokl. Vsesojuzn. Akad. Sel'skhoz. Nauk S. S. S. R.*, 3, 34-38 (trad. S. I. G. n° 4042).
- ALEKSANDROV, V. G. (1950). — *Izvest. Kujbyshchv. SKH L.*, 10.
- ALEKSANDROV, V. G. et ZAG, G. A. (1950). — *Mikrobiol. S. S. R.*, 19, 2, 97-101 (trad. B. R. G. M. n° 3154).
- B. R. G. M., DEPT. LABORATOIRES. *Bull. B. R. G. M.*, Sect. II, 5, 15-59.
- LELEU, M., SARCIA, G. et GONI, J. (1973). — Essai d'interprétation des phénomènes naturels d'altération des silicates : le cas de l'allbite et de l'orthose, Congrès international de géochimie organique, Recueil, sept. 1973.
- GONI, J., GUGALSKI, T. et SIMA, M. (1973). — Sur la solubilisation du potassium de la muscovite. *Bull. B. R. G. M.*, Sect. IV, 7, 31-45.
- HEINEN, W. (1963). — *Arch. Mikrobiol., Dtsch.*, 37, 199-210.
- HEINEN, W. (1967). — *Arch. Mikrobiol., Dtsch.*, 45, 172-178. *Archs. Biochem. Biophys.*, U. S. A., 120, 80-107.
- JACKS, G. V. (1953). — *Sci. Prog., G. B.*, 41, 301-305.
- NEHER, J. et ROHRER, E. (1950). — *Eclog. géol. Helv.*, 51, 213-215.
- OBERLIPS, F. et ZATANOVIC, J. (1964). — Über ein illitiches Tonvorkommen in Jugoslavien und Betrachtungen zu seine Entstehung. *Ber. Dtsch. Keram. Gesellsch.*, 41, 601-675.
- SILVERMAN, M. P. et MUNOZ, E. (1970). — *Science*, 169, 685-687.
- WAGNER, E. et SCHMARTZ, W. (1965). — *Z. allg. Mikrobiol.*, 3, 52-70.

*Bull. Soc. Jr. Minéral. Cristallogr.*, 1973.

- TESIC, Z. P. et TODOROVIC, M. S. (1954). — *Zelljiste i biljka. Jugosl.*, 1, 3-18.
- TESIC, Z. P. et TODOROVIC, M. S. (1958). — *Zelljiste i biljka Jugosl.*, 8, n° 1-3, p. 233-244 (trad. S. I. G. n° 4030).

### LES CYCLES DU FER ET DU MANGANÈSE.

- BERTRAND, C. (1905). — *Rev. gen. Chimie Fr.*, 8, 200.
- BROMFIELD, S. M. (1958). — *Plant and Soil, Netherl.*, 9, 325-335.
- EHRLICH, H. L. (1963). — *Applied Microbiol. U. S. A.*, 11, 1, 15-19.
- MALVONSON, H. O. et STARKEY, R. L. (1927). — *Phys. Chem. Glasses, G. B.*, 31, 626-631.
- EHRENBURG, C. C. et STARKEY, R. L. (1899). — *Pogg. Annln. Phys. Chem.*, 38, 213-227.
- PERFILA, B. Y., GALE, D. R., GOL'PERIN, A. M., RAJNOVICH, V. A., SAFERJUSKEL, A. A., SHERMAN, E. E. et TROSHANOV, E. P. (1964). — *Applied capillary microscopy, the role of microorganisms in the formation of iron manganese deposits*, Consultat Bureau, N. Y., 1965.
- WINOGRADSKI, M. S. (1888). — *Bot.*, 7, 46, 201-270.
- EHRLICH, H. L. (1970). — *Appl. Microbiol. U. S. A.*, 21, 300-310.
- WOOLFOLK, C. A. et WHITLEY, M. R. (1962). — *J. Bacteriol., U. S. A.*, 82, 947-958.

### LE CYCLE DU SOUFRE.

- AGATE, A. D. et VISHINIAC, W. (1969). — *Bacteriol. Proc. U. S. A.*, 29.
- AGATE, A. D. et VISHINIAC, W. (1970). — Characterisation of thiobacilli by gas-liquid chromatography. Congrès international de microbiologie, Mexico, 9, 18, VIII.
- AGATE, A. D. et VISHINIAC, W. (1970). — *Bacteriol. Proc. U. S. A.*, Cf. P., 14.
- AGATE, A. D., KORCZYNSKI, M. S. et LUNDGREEN, D. G. (1960). — Extracellular complex from the culture filtrate of *Ferrobacillus ferro-oxidans*. *Canad. J. Microbiol.*, 18, 250-264.
- BECK, J. V. et BROWN, D. G. (1968). — *J. Bacteriol., U.S.A.*, 96, 1433-34.
- BECK, J. V. (1970). — *Thiobacillus ferrooxidans* and its relations to the solubilisation of ores of copper and iron. In : Fermentation advances ed. by D. Perlman 747-771, London, New York, Academic Press.
- BEJBERINCK, N. W. (1895). — *Central Bakt. H. Abt.*, 1, 1-9, 49-50, 104-114.
- KELLY, D. P. (1968). — Biochemistry of oxidation of inorganic sulphur compounds by micro-organisms. *Austral. J. appl. Sci.*, 31, 5, 105.
- KORCZYNSKI, M. S., AGATE, A. D., LUNDGREEN, D. G. et ELLAR, D. J. (1967). — *Bacteriol. Proc. U.S.A.*, G. 22.

- KORCZINSKI, M. S., AGATE, A. D. et LUNDGREEN, D. G. (1967). — *Biochem. biophys. Res. Commun.*, *U. S. A.*, 29, 4, 357.
- KORCZINSKI, M. S., AGATE, A. D. et LUNDGREEN, D. G. (1968). — *Bacteriol. Proc.*, p. 73.
- LAMBERT, J. B. et BURELA, B. (1970). — Banded sulphide ores: the experimental production of monomineralic sulphide bands in sediments. Commonwealth of Australia, Commonwealth scientific and industrial research organization, Repr. from *Mineralium deposita*, 5, 2, 97-102, (c) Berlin-Heidelberg Springer.
- LAMBERT, J. B., ANDREW, M. C. J. et JONES, H. E. (1971). — *Proc. Austr. Mining and Metallurgy*, n° 240.
- LELEC, M. et GONI, J. (1973). — Sur la biogenèse de stalactite de galène. *Mineralium deposita* (à paraître).
- LE NINDRE, Y. M. (1973). — Possibilités de mise en solution des métaux sulfurés et oxydés, aux fins de concentration des minerais pauvres. 1<sup>re</sup> partie, synthèse bibliographique. Rapport interne B. R. G. M. (non publ.).
- MALOUF, E. E. et PRATER, J. D. (1961). — Role of bacteria in the alteration of sulphide minerals. *J. Metals*, *U. S. A.*
- MURRAY, J. et IRVINE (1863). — *Trans. r. Soc. Edinburgh*, 37, 48.
- NAPIER, E., WOOD, R. G. et CHAMBERS, L. A. (1967). — A symposium to be held in London 17-20 april 1967. *Instn. Min. Metal.*, *G. B. Paper 39*.
- NIELSEN, A. M. et BECK, J. V. (1972). — *Science, USA*, 175, 1114-16.
- RICKARD, D. T. (1966). — The microbial formation of iron sulphides. *Contrib. in geol., Stockholm*, 29, 49-62.
- THOUVENIN, O. H., NIEMELA, S. I. et GYLLENBERG, H. G. (1971). — Tolerance of *Thiobacillus ferrooxidans* to some metals. *Antonie van Leeuwenhoek, J. Microbiol. and Serology, Netherl.*, 37, 4, 481-90.
- TRUDINGER, P. A. (1971). — *Miner. Sci. Engineer.*, 3, 4, 13-25.
- ZAJIC, J. E. (1969). — Microbial biogeochemistry. New York, Academic Press.
- BRUYNSTEYN, A. et DUNCAN, D. W. (1971). — *Canad. metallurg. quarterly*, 10, 1.
- CORRICK, J. D. et SUTTON, J. A. (1968). — U. S. Dept. Inter. Bur. Mines, Rep. Invest., 7126.
- DUNCAN, J. W. et TEATHER, C. J. (1969). — U. S. patent office, 3-294-889, Patentet august 16, 1966, Filed apr. 7, 1964, ser. n° 357, 907, 8 colonnes.
- DUNCAN, D. W., WALDEN, C. C. et TRUSSEL, P. C. (1967). — U. S. Patent office, 3, 305, 876, 10 colonnes.
- FLETSCHER, A. W. (1970). — *Trans., section C Instit. Min. Metal.*, (*I. M. M.*) *G. B.*
- GUPTA, R. C. et SANT, B. R. (1970). — *J. sci. Industrie. Res. (India)*, August 1970.
- LEROUX, N. W., NORTH, A. A. et WILSON, J. C. (1973). — Bacterial oxydation of pyrite. IMPC, Congress London, 1973.
- MALOUF, E. E. et PRATER, J. D. (1962). — New technology of leaching waste dumps. Mining congress Journal, november 1962, p. 82-85.

Directorio de Alumnos del Curso: Geofísica Moderna de Prospección 1982.

- |  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p>1. Rubén L. Quiétre, Tapia<br/>Consejo de Recursos Minerales<br/>Jefe de Proyecto<br/>Niños Héroes No. 137<br/>Col. Doctores<br/>México, D.F.<br/>588 71 41</p>                                   | <p>Calle E Manz. VI No.6.<br/>Col. Educación<br/>Coyoacán<br/>México, D.F.<br/>544 40 20</p>   | <p>7. Jorge De la Torre Robles<br/>GYMSA Estudios de Planeación Regional, S.A.<br/>Gerente<br/>Citlaltepetl 21<br/>Hipódromo Condasa<br/>D. B. Juárez<br/>México, DF.<br/>2867 889</p>        | <p>Bosque del Castillo 56<br/>La Herradura<br/>Mun. Huixquilucan<br/>56930 México, D.F.<br/>2941082</p> |
| <p>2. Juan A. Galicia Cortés<br/>Consejo de Recursos Minerales<br/>Niños Héroes 139<br/>Gerencia de Estudios Especiales<br/>México, D.F.<br/>588 85 19</p>   | <p>Ote. 3 L. 6 M. 22<br/>Col. Cuchilla del Tesoro<br/>D. G. A. Madero<br/>México, D.F.<br/>794 47 50</p>   | <p>8. Rafael Pentanes Hoz<br/>GYMSA, Estudios de Planeación Regional, S.A.<br/>Jefe de Proyecto<br/>Citlaltepetl 25<br/>Hipódromo Condasa<br/>D. B. Juárez<br/>México, D.F.<br/>286 11 65</p> | <p>Porfirio Díaz 202-B<br/>Col. del Valle<br/>México, D.F.</p>  |
| <p>3. Marcelo Acosta Soto,<br/>SAHOP<br/>Vallarta 5-3°<br/>San Rafael<br/>Cuauhtémoc<br/>México, D.F.<br/>566 97 71</p>  | <p>Anaxágoras 616-2<br/>Narvarte<br/>D. B. Juárez<br/>03020 México, D.F.</p>   | <p>9. Javier Flores Hernández<br/>SAHOP<br/>Supervisor<br/>Vallarta 5-301<br/>Revolución<br/>D. Cuauhtémoc<br/>México, D.F.<br/>566 97 81</p>   | <p>E. Carranza 73<br/>Magd. Contreras<br/>10910 México, D.F.</p>  |
| <p>4. Joaquín Arfán Cortés<br/>S A H O P<br/>Vallarta 5-301<br/>Tabacalera<br/>D. Cuauhtémoc<br/>México, D.F.<br/>566 97 71</p>  | <p>Ings. Civ. 29<br/>Jardines de Churubusco<br/>Iztapalapa<br/>México, D.F.<br/>670 18 57</p>  | <p>10. Jorge A. Gómez Godoy<br/>Uronio Mexicano<br/>Encargado de Brigada<br/>Insurgentes Sur 1079<br/>Nochebuena<br/>México, D.F.<br/>563 71 00</p>   | <p>J. L. Fortillo Mz. 167 Lt. 31<br/>Sta. Teresa<br/>D. G. A. Madero<br/>México, D.F.</p>               |
| <p>5. Araceli Cabrera Ortiz<br/>SAHOP<br/>Supervisora de Est. Geohidrológicos<br/>Vallarta 5-3°<br/>D. Cuauhtémoc<br/>México, D.F.<br/>566 9771</p>  | <p>Condor 289-4<br/>D. A. Obregón<br/>México, D.F.<br/>593 16 64</p>   | <p>11. Pablo Ibarra Mora<br/>GYMSA Estudios de Planeación Regional, S.A.<br/>Citlaltepetl 25<br/>Hipódromo Condasa<br/>México, D.F.<br/>553 60 00</p>   | <p>Morena 118-403<br/>Del Valle<br/>Cuauhtémoc<br/>México, D.F.</p>                                     |
| <p>6. Melania P. Castro Ramírez<br/>SARH<br/>Jefe de la Ofic. de Trazadores Radioactivos Agulas<br/>Teotihuacán 18<br/>Hipódromo -Condasa<br/>D. Cuauhtémoc<br/>México 06100, D.F.<br/>584 27 45</p> | <p>Roberto Mancjeras Rico<br/>SAHOP<br/>Jefe de la Oficina Zona Sur<br/>Vallarta 5-3°<br/>Tabacalera<br/>Cuauhtémoc<br/>México, D.F.<br/>566 97 81</p> | <p>Kochicalco Nte. 30-9A<br/>Narvarte<br/>D. B. Juárez<br/>03020 México, D.F.<br/>519 75 90</p>   |   |





13. José Morales Rodríguez  
GYMSA Estudios de Planeación, Regional, S.A.  
Cuixtlapecotl No. 25  
Hipódromo Condessa  
D.A. Obregón  
06070 México, D.F.  
511 24 76
14. Julia Gpe. Pacheco Avila  
Universidad de Yucatán  
Investigador del Programa de Hidrología  
Calle 41 Ex-Terrenos del Périx  
97158 Mérida, Yuc.  
7 30 44
15. Agustín J. Parra García  
Geocón, S.A.  
Director General  
Quemada 129-603  
Narvarte  
D.H. Juárez  
México, D.F.  
519 81 45
16. Felipe Parra Samano  
SAHOP  
Dir. Gral. de Stat. de A.P. y A. en  
Centros Urbanos  
Vallarta 5-3°  
Sao Rafael  
Cuauhtémoc  
México, D.F.  
566 97 71
17. Raúl O. Torres Chiu  
Industrial Minera México, S.A.  
Jefe de Geólogos  
Mina Tiro Gral.  
Charcas, S.L.P.  
200 19
18. Mario E. Vázquez Meneses  
Consejo de Recursos Minerales  
Jefe de Proyecto  
Niños Héroes Esq. Dr. Navarro  
Doctores  
México, D.F.  
578 59 42
19. María Gpe. Villaseñor Cabral  
Instituto de Geología  
Fac. de Ingeniería  
Jefe del Depto. de Geoquímica  
Profesor  
UNAM  
Coyoacán  
4510 México, D.F.  
550 52 15 Ext. 4268
20. Miguel J. Villaseño Pino  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Yucatán  
Investigador  
Calle 41 x 14  
Exterrenos El Périx  
Chumindópolis  
Mérida, Yuc. 97158  
73044
21. María Vilas Sendle  
Instituto de Ingeniería  
Investigador  
UNAM  
México, D.F.  
550 52 15 Ext. 3604
22. Rafael Yrip Ocaña  
Instituto de Inv. Eléctricas  
Investigador  
Interior Internado Palmira  
Cuernavaca, Mor.  
4 38 11
- M.A. de Quevedo 962 B 303  
Parque San Andrés  
Coyoacán  
4010 México, D.F.  
544 57 27
- Calle 74 No. 480 (53 y 55)  
Mérida 97144, Yucatán  
309 29
- Copilco 76 - Ed. A-3 Depto. 603  
Copilco el Bajo  
Coyoacán  
043 44 México, D.F.  
547 0012
- Cerrada de Palma 42  
Palmira  
Cuernavaca, Mor.  
4 12 23

