

JEAN PAUL NOVEL (*), MARIO RAVELLO (**),
MARTIAL DRAY (*), FABRIZIO POLLICINI (**), & GIAN MARIA ZUPPI (**)

CONTRIBUTION ISOTOPIQUE (^{18}O , ^2H , ^3H) A LA COMPREHENSION DES MECANISMES D'ECOULEMENT DES EAUX DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES EN VALLEE D'AOSTE (ITALIE)

ABSTRACT: NOVEL J.P., RAVELLO M., DRAY M., POLLICINI F. & ZUPPI G.M., *Isotopic contribution (^{18}O , ^2H , ^3H) in the understanding of the flow pattern in surface water and groundwater in the Aosta valley (Italy)*. (IT ISSN 0391-9838, 1995).

In a comprehensive study dealing with the water resources in the Aosta valley isotope analyses have been carried out on precipitation, runoff waters and groundwaters.

The main targets were to provide: the evidence of the effective infiltration, the evaluation of sublimation and evaporation losses from the surface of the glaciers, the delineation of the recharge areas and of the origin of surface and groundwater flows, the input of glacier underflow in the recharge of the aquifers, the estimation of the turnover time of the different water bodies.

The main results drawn from two hydrologic cycles span time exhibit the complexity of the hydrologic system of the Aosta valley as linked to:

- the humid air masses circulation (oceanic or mediterranean origin, presence of successive mountains barriers, ...)
- the relative orientation and geographic situation of the valleys versus these circulations
- the role of the glaciers and their associate rocky substratum in the qualitative and quantitative change in their outflow.

KEY WORDS: Isotopes, Precipitation, Glacier, Surface water, Groundwater, Aosta Valley.

RESUMMÉ: NOVEL J.P., RAVELLO M., DRAY M., POLLICINI F. & ZUPPI G.M., *Contribuzione isotopica (^{18}O , ^2H , ^3H) à la compréhension des mécanismes d'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines en Vallée d'Aoste (Italie)*. (IT ISSN 0391-9838, 1995).

Dans le cadre de l'étude concernant l'évaluation qualitative et quantitative des ressources en eau de la région d'Aoste, des analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^3H) ont été réalisées sur les précipitations, les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces analyses ont eu pour but: de définir l'infiltration efficace, d'évaluer les pertes par évaporation et par sublimation de la surface des glaciers, de déterminer les zones de recharge, et ainsi l'origine des écoulements de surface et souterrains; d'apprécier le rôle des écoulements sous-glaciaires dans la recharge des aquifères; d'estimer les temps de séjour dans les différents réservoirs.

Les résultats qui portent sur deux cycles hydrologiques traduisent une complexité liée à la fois:

- aux circulations des masses d'air humide (origine océanique ou méditerranéenne, franchissement successif de chaînes et vallées, ...);
- à l'orientation et à la localisation géographique des vallées et des glaciers par rapport à ces grandes circulations;
- au rôle du glacier et de son substratum rocheux dans la circulation et la modification quantitative et qualitative des eaux.

MOT CLES: Isotopes, Précipitation, Glacier, Eau de surface, Eau souterraine, Vallée d'Aoste.

RIASSUNTO: NOVEL J.P., RAVELLO M., DRAY M., POLLICINI F. & ZUPPI G.M., *Contributo dell'analisi isotopica (^{18}O , ^2H , ^3H) alla comprensione dei meccanismi di flusso delle acque di superficie e delle acque sotterranee in valle d'Aosta (Italia)*. (IT ISSN 0391-9838, 1995).

Nel quadro degli studi sulla valutazione qualitativa e quantitativa delle risorse acquifere della Valle d'Aosta, sono state eseguite analisi isotopiche (^{18}O , ^2H , ^3H) delle acque di precipitazione, delle acque di superficie e sotterranee. Le analisi hanno permesso di definire l'infiltrazione efficace, di valutare le perdite per evaporazione e per sublimazione alla superficie dei ghiacciai, di determinare le zone di ricarica ed anche l'origine degli scorrimenti superficiali e sotterranei, di apprezzare il ruolo degli scorrimenti di fondo glaciali nella ricarica degli acquiferi, di stimare i tempi di permanenza delle differenti riserve.

I risultati che riportano a due cicli idrologici si traducono in una situazione complessa legata:

- alla circolazione di masse d'aria umide (di origine oceanica o mediterranea, presenza di successive barriere montuose e di valli...)
- alla orientazione e localizzazione delle valli e dei ghiacciai in relazione a queste circolazioni
- al ruolo dei ghiacciai e al substrato litologico nella circolazione e alla modificazione qualitativa e quantitativa delle acque.

TERMINI CHIAVE: Isotopi, Precipitazione, Ghiacciaio, Acqua superficiale, Acqua sotterranea, Valle d'Aosta.

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude concernant l'évaluation qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine de la région d'Aoste, des analyses chimiques et isotopiques ont été réalisées sur les précipitations, les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces analyses ont eu pour but:

- de définir l'infiltration efficace

(*) Centre de Recherches Géodynamiques, Thonon les Bains, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

(**) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino.

Communication présentée à la réunion du «Centenaire de la recherche glaciologique en Italie» tenue à Turin, Italie, du 19 au 20 Octobre 1995. (Communication presented at the Meeting «100 Years of Glaciological research in Italy», Turin, 19-20 October 1995).

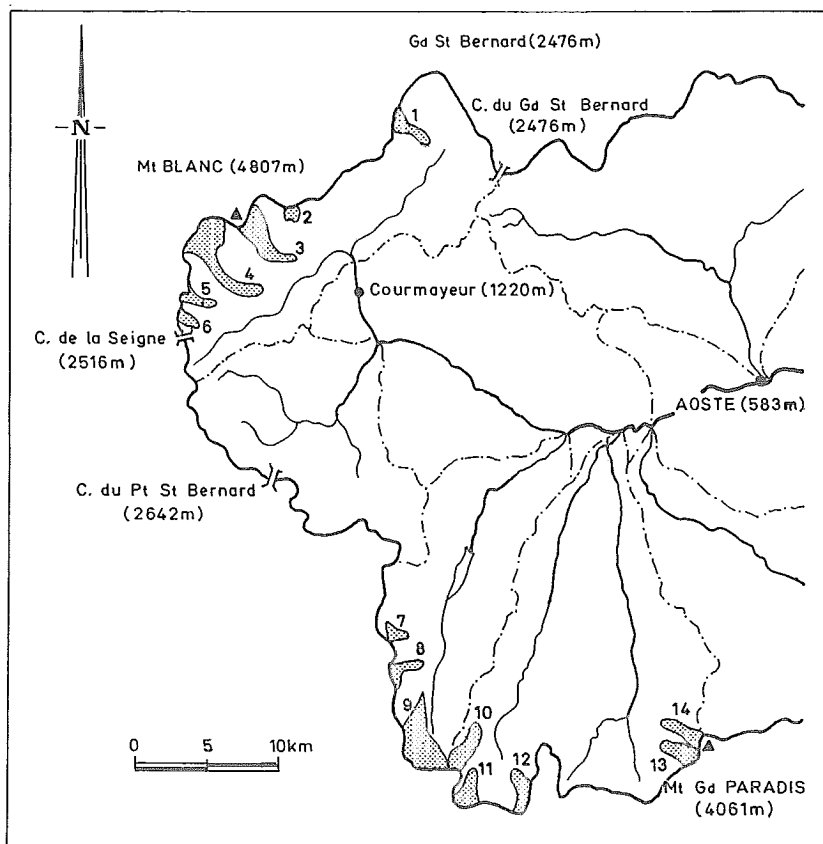


FIG. 1 - Bassin versant de la Doire, réseau hydrographique et localisation des glaciers. 1 - glacier du Triolet; 2 - glacier de Toula; 3 - glacier de la Brenva; 4 - glacier du Miage; 5 - glacier de la Lex Blanche; 6 - glacier de l'Estellette; 7 - glacier de l'Ormelume; 8 - glacier de la Platte des Chamois; 9 - glacier du Vaudet; 10 - glacier de Sotses; 11 - glacier de Fond; 12 - glacier de Lavessey; 13 - glacier du Grand Paradis; 14 - glacier de Leciau.

FIG. 1 - The Doria Basin, hydrographic network and localization of glaciers. 1 - The Triolet Glacier; 2 - The Toula Glacier; 3 - The Brenva Glacier; 4 - The Miage Glacier; 5 - The Lex Blanche Glacier; 8 - The La Platte de Chamois Glacier; 9 - The Vaudet Glacier; 10 - The Sotses; 11 - The Fond Glacier; 12 - The Lavessey Glacier; 13 - The Grand Paradis Glacier; 14 - The Leciau Glacier.

— d'évaluer les pertes par évaporation et par sublimation de la surface des glaciers

— de déterminer les zones de recharge, et ainsi l'origine des écoulements de surface et souterrains;

— d'estimer les temps de séjour dans les différents réservoirs aquifères;

La compréhension des écoulements en région de haute montagne nécessite à la fois des connaissances précises concernant, la géologie, la tectonique, et un suivi hydrométéorologique détaillé du fait des variations importantes (température et volume), souvent rapides, en haute altitude où les précipitations se présentent en phases solide et liquide. La chimie des écoulements, liée à la nature pétrographique de l'encaissant et à l'origine des masses humides, peut apporter une contribution non négligeable à cette compréhension. On utilise surtout les sulfates, présents dans la plupart des contacts tectoniques majeurs des Alpes (BORTOLAMI & *alii*, 1984), et les chlorures qui éventuellement peuvent marquer l'existence d'anciennes évaporites (DAZY & *alii* 1987) mais principalement les précipitations d'origine marine (PARRIAUX & *alii*, 1990).

Cette dernière hypothèse apparaît être la principale source de minéralisation des eaux de surface du Val d'Aoste: neige, glaciers et réseau hydrographique (NOVEL, 1995). Comme toutes les autres vallées alpines franco-italo-suisse cette vallée se situe à l'intersection des influences océaniques, malgré la présence de la barrière du Mont Blanc, mais aussi de la Méditerranée par l'arrivée

d'air marin du Golfe de Gènes. Afin de préciser l'influence saisonnière de ces masses d'air océaniques ou méditerranéenne sur la recharge en eau, nous avons fait appel au traçage isotopique naturel. En effet, le meilleur marqueur de l'eau reste encore la molécule d'eau elle-même, dont les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène véhiculent des informations concernant à la fois l'origine (^{18}O et ^2H , isotopes stables) et l'âge (^3H isotope radioactif), communément appelés traceurs du milieu ou de l'environnement (FRITZ & FONTES, 1980).

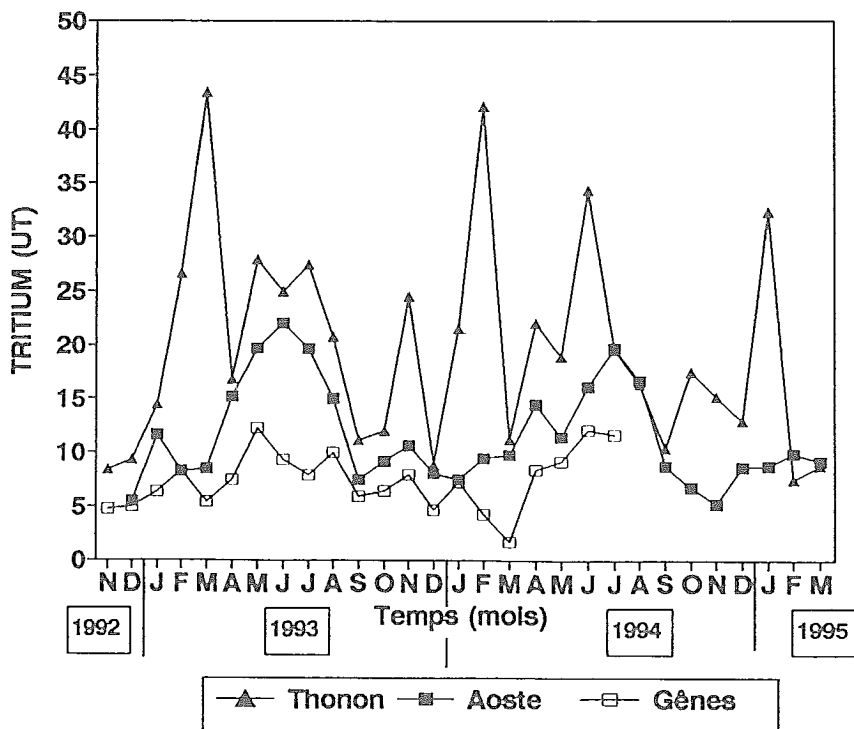
Les avantages de l'application de ces traceurs résident essentiellement dans la possibilité d'étudier les différents milieux naturels suivant leur évolution en régime permanent, en chaque point et à chaque instant de leur cycle, (AIEA, 1981; AIEA, 1983). Les concentrations des isotopes stables (^2H , ^{18}O) sont exprimées en pour mille: la notation δ traduit la variation de concentration en isotope lourd (deutérium ou oxygène - 18) d'un échantillon par rapport à celle de l'étalon de référence (V-SMOW) qui est par définition égal à 0 (CRAIG, 1961). L'excès en deutérium (d), correspondant à la valeur de l'ordonnée à l'origine dans la corrélation deutérium-oxygène 18, est également exprimé en d pour mille (AIEA, 1981).

La concentration en Tritium (^3H), s'exprime en UT (Unité Tritium); 1 UT équivaut à 1 atome de Tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène (AIEA, 1983).

Les isotopes du milieu obéissent aux mêmes lois que celles qui régissent les réactions chimiques (lois d'action de

FIG. 2 - Variation des teneurs en Tritium dans les précipitations d'Aoste, Thonon, et Gènes.

FIG. - Tritium content variations in the precipitations at Aosta, Thonon and Genova.



masse). Cependant, la spécificité de leur emploi vient du fait que des échanges isotopiques interviennent (entre deux composés ou deux phases comportant le même élément) sans aucun changement dans la distribution des espèces chimiques AIEA, 1981; FRITZ & FONTES, 1980).

De ce fait l'approche isotopique va porter sur les précipitations et les écoulements souterrains dans les versants mais surtout dans les écoulements sous glaciaires qui fournissent la quasi totalité de l'écoulement de surface de la Doire (fig. 1). Cette rivière recharge la nappe alluviale d'Aoste qui fournit la commune d'Aoste et les communes limitrophes en eau potable. Dans le cadre de plusieurs thèses réalisées sur la vallée par ROSSO (1987), RAVELLO (1992), POLLICINI (1994), CARROZZA (1995) et par NOVEL (1995) nous avons essayé de comprendre le système hydrologique en combinant toutes les approches possibles et en privilégiant l'approche isotopique.

LES PRECIPITATIONS

1) LES PRECIPITATIONS LIQUIDES

a) l'oxygène 18

L'analyse climatique a montré l'existence de différences importantes notamment pluviométriques à l'intérieur de la vallée d'Aoste (JANIN 1980). Le choix des sites de prélèvement a été basé sur deux critères: l'altitude, pour la détermination des gradients en fonction de la température, et

la géographie, pour la mise en évidence de l'influence de l'origine et des trajectoires des masses d'air humides.

Deux gradients annuels en fonction de l'altitude ont été établis pour la période 1933-1969 (NOVEL 1995) un de 23 mm par 100 m dans le secteur central de la vallée, et l'autre de 60 mm par 100 m sur le versant sud-ouest du massif du Mont Blanc. Cette variabilité se traduit en différence de gradients isotopiques (BLAVOUX, 1978).

Par ailleurs, le secteur nord occidental de la vallée d'Aoste apparaît sous l'influence des perturbations atlantiques, tandis que le secteur sud oriental est principalement sous celles d'origine méditerranéenne. Chacune de ces influences est bien marquée isotopiquement (ZUPPI & *alii* 1974). L'effet de masse et l'origine contrôlent ainsi la composition isotopique des précipitations et donc caractérisent le signal d'entrée dans le système hydrologique de la Vallée. Ce signal sera comparé aux teneurs isotopiques des torrents sous-glaciaires qui représentent la contribution la plus importante à l'écoulement de la Doire (NOVEL & *alii* 1996) et à la recharge des aquifères fracturés (FONTES & *alii* 1979).

En complétant le réseau pluviométrique existant par des points en altitude (Plateau Rose, Pointe Hellbronner), les gradients isotopiques en ^{18}O des précipitations ont été déterminés sur 12 sites sélectionnés sur les critères décrits précédemment. Pour 1994 les gradients obtenus sont les suivants:

$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = 0,35(\text{T}^\circ\text{C}) - 12,5$ sur l'ensemble de la Vallée,

$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = -0,0023$ (altitude en m) - 8 sur le secteur nord-occidental

$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = -0,0021$ (altitude en m) - 7 sur le secteur sud-oriental.

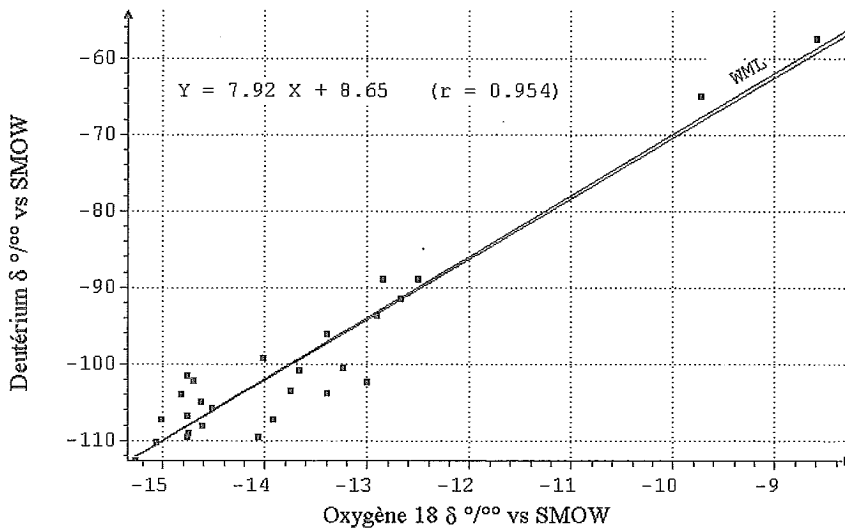


FIG. 3 - Relation Deutérium-Oxygène 18 dans les différents torrents sous-glaciaires du bassin versant.

FIG. 3 - Deutérium-Oxygen 18 relations in the different underglacial torrents of the basin.

Ces résultats sont comparables à ceux établis dans la même région alpine: BLAVOUX (1978) en Haute Savoie (France), BORTOLAMI & *alii* (1982) dans la province de Cuneo (Italie), DRAY & *alii* (1990) dans le Canton du Valais (Suisse).

b) Le tritium

Ce traceur, tout comme l'oxygène 18, identifie très bien l'origine des masses d'air atlantiques ou méditerranéennes et sert de marqueur de la circulation atmosphérique en Val d'Aoste.

Les chroniques des deux stations de références AIEA (1992), Thonon pour le versant atlantique, et Gênes pour le versant méditerranéen, ont servies à calculer les temps de résidence des eaux dans les différents systèmes hydriques (RAVELLO, 1992; NOVEL, 1995). Il faut signaler que les précipitations à Thonon affichent des teneurs en Tritium élevées conséquence de l'activité industrielle continentale. Au contraire, à Gênes les échanges avec la vapeur marine amènent à un appauvrissement de la teneur en Tritium des précipitations (GAT, 1980; GONFIANTINI & *alii*, 1996).

La situation géographique et climatique de la Vallée doit se refléter dans les concentrations en Tritium des précipitations (DRAY en prép.). En effet, l'évolution assez régulière des teneurs mensuelles à la station d'Aoste (fig. 2) se traduit par des faibles valeurs en automne-hiver (contribution essentiellement méditerranéenne) et un pic bien marqué au début de l'été (contribution océanique/continentale).

En 1993 et 1994 les valeurs moyennes annuelles pondérées à la station d'Aoste s'élevaient respectivement à 11,7 UT et 9,5 UT ($\pm 0,6$).

2) LES PRECIPITATIONS SOLIDES

Les précipitations neigeuses sur le bassin représentent un stock d'eau disponible important pour la recharge différée, d'autant que 75% du volume précipité provient d'alti-

tudes dépassant les 2000 m. En Vallée un profil de neige effectué sur le glacier de Toula (RAVELLO, 1992) a montré une variation de 6 pour mille sur 60 cm de neige. Des profils de carottes de neige (entre 1,5 m et 3 m de profondeur) effectués dans les vallées suisses voisines ont montré des variations en ^{18}O d'une dizaine de deltas (DRAY & *alii*, 1990).

Les carottes prélevées dans différents glaciers des massifs du Mont Blanc, et du Mont Rose sur une profondeur de 1,5 m (ROSSO, 1987; RAVELLO, 1992). Ce fait traduit une homogénéisation du signal «neige» lors de sa transformation en signal «glace» par des processus répétés de sublimation-solidification, et fusion-infiltration-solidification (JOUZEL & SOUCHEZ, 1982).

Si l'on met en parallèle les circulations atmosphériques apportant les perturbations atlantiques par le col de la Seigne (RAVELLO, 1992), on constate, sur le versant valdotain du Mont Blanc, un appauvrissement isotopique d'ouest en est; ceci se traduit par des valeurs isotopiques moyennes de la glace (tranche de comparaison 0-70 cm) suivantes: Estelette = -13,79, Brenva = -14,43, Toula = -14,60, Triolet = -15,67 δ ‰ vs VSMOW.

LES SOUS-ECOULEMENTS GLACIAIRES

Les torrents sous-glaciaires représentent la composition moyenne pluriannuelle de la glace et montrent une stabilité isotopique remarquable d'une année sur l'autre (AMBACH & *alii*, 1976, BORTOLAMI & *alii*, 1979). Pour la période 1988-1992 on trouve (RAVELLO, 1992):

pour la Brenva: -15,27, -15,28, -15,21, et -15,48 δ ‰ vs VSMOW

pour le glacier du Miage: -14,70, -14,73, -14,60,

pour le glacier de Lex Blanche: -14,76, -14,63, -14,67,

On confirme, comme pour la glace, une variation sud-ouest nord-est des valeurs en ^{18}O de ces sous écoulements

en correspondance avec les grandes circulations d'air humide. Par exemple pour l'année 1989, un appauvrissement isotopique dans cette direction est notable: Estelette = -14,63, Lex Blanche = -14,63, Miage = -14,73, Brenva = -15,28, Toula = -16,80.

Les valeurs plus négatives d'environ un pour mille des sous-écoulements glaciaires par rapport à celles des carottes de glace traduisent le phénomène d'ablation qui s'accompagne d'un fractionnement isotopique entre la phase solide et la phase liquide. En prenant -10°C comme valeur de la température à l'intérieur du glacier on obtiendrait un appauvrissement isotopique en oxygène -18 de 0,7 ‰ (JOUZEL & SOUCHEZ 1982, NAKAWO & alii, 1989).

La relation deutérium - oxygène -18 (CRAIG, 1961), montre un alignement des points très voisin de la droite des eaux météoriques mondiales avec un excès en deutérium voisin de 10 (fig. 3). Il semble donc que l'évaporation et la sublimation ne jouent pas un rôle important dans la modification du signal d'entrée de la recharge et que leurs effets antagonistes se compensent.

Les données en tritium, avec des valeurs très variables entre 1,5 et 40 UT, traduisent des temps de résidence très différents. Ceci souligne de courts séjours des eaux sous forme solide avec un d'âge inférieur à 10 ans, alimentant la plupart des torrents sous-glaciaires. Sur l'ensemble des torrents analysés seules les eaux des glaciers Miage et Lavassey affichent un âge supérieur à quelques dizaines d'années (RAVELLO, 1992; NOVEL, 1995; NOVEL & alii, 1996).

CONCLUSION

Cette étude isotopique en vallée d'Aoste a permis de mettre en évidence deux phénomènes remarquables:

— La très grande homogénéisation du signal isotopique en ^{18}O dans les glaciers et dans les sous-écoulements glaciaires. Ces sous-écoulements vont, en amont des plaines alluviales de montagne, recharger les eaux souterraines présent dans les dépôts grossiers de tête de remplissage glaciaire et tardiglaciaire. De ce fait les teneurs isotopiques des eaux souterraines seront globalement indépendantes du signal précipitations qu'on lie habituellement au gradient altimétrique.

— La différenciation entre les apports océaniques et méditerranéens facilement identifiables par des teneurs en tritium nettement plus importantes (moyenne pondérée et amplitude) lorsque les masses humides proviennent de l'ouest.

Il sera intéressant de contrôler dans d'autres vallées alpines sous climat tempéré si ces deux phénomènes peuvent être généralisés aux ressources en eau de haute montagne.

BIBLIOGRAPHIE

A.I.E.A. (1981) - *Stable isotope hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle*. IAEA, Vienna, STI/Doc 10/210, 337 p.
 A.I.E.A. (1983) - *Guidebook on nuclear techniques in hydrology*, - 1983 edition. IAEA, Vienna, STI/Doc 10/91/2, 439 p.

A.I.E.A. (1992) - *Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation*. IAEA, Vienna, STI/Doc 10/331, 781 p.
 AMBACH W., EISNER H., ELSASSER M., LOSCHHORN U., MOSER H., RAUERT W. & STICHLER W. (1986) - *Deuterium, tritium and gross-beta-activity investigations on alpine glaciers (Oetztal Alps)*. Journ. Glaciol., 17, 383-401.
 BLAVOUX B. (1978) - *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium*. Thèse Doct.ès Sciences, Université P. et M. Curie, Paris, 345 pp.
 BORTOLAMI G.C., FONTES J.C., LALE DEMOZ D., OLIVE P., QUIJANO L. & ZUPPI G.M. (1979) - *Infiltration rate through the crystalline rocks of Mont Blanc massif evidenced by environmental isotope measurements*. In «Proceedings of the workshop on low-flow, low-permeability measurements in largely impermeable rocks», OECD/NEA, Paris, 237-247.
 BORTOLAMI G.C., RICCI B., SUSELLA G.F. & ZUPPI G.M. (1982) - *Hydrogeochemistry of the Corsaglia valley, Maritime Alps, Piedmont, Italy*. Journ. Hydrol., 44, 57-79.
 BORTOLAMI G.C., OLIVERO G.F. & ZUPPI G.M. (1984) - *Sistemi idrici profondi geotermali e freddi in Piemonte e Valle d'Aosta*. Mem. Soc. Geol. It., 29, 171-185.
 CARROZZA D. (1994) - *Tipologia di alcuni acquiferi circostanti la piana valliva di Aosta (studio geochimico ed isotopico)*. Fac. Sc. M.F.N., Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università di Torino, 151 pp. (inedita).
 CRAIG H. (1961) - *Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters*. Science, 133, 1833-1835.
 DAZY J., DRAY M., JUSSERAND C., PASQUALOTTO M. & ZUPPI G.M. (1987) - *Caractérisation isotopique des eaux thermominérales des Alpes franco-italiennes*. In «Isotope techniques in water resources development», IAEA, Vienna, STI/PUB 757, 3-24.
 DRAY M., PARRIAUX A. & DUBOIS J.D. (1990) - *Image synchrone de la composition isotopique de la couverture neigeuse des Alpes de Suisse occidentale*. In «Hydrology in mountainous regions. I-Hydrological measurements; the water cycle», IAHS Publ. 193, 447-454.
 DRAY M. (1996) - *Distribution du tritium dans les précipitations des Alpes du Nord* (en prep.).
 FONTES J.C., BORTOLAMI G.C. & ZUPPI G.M. (1979) - *Hydrologie isotopique du massif du Mont Blanc*. In «Isotope Hydrology 1978», vol. 1, IAEA, Vienna, STI/PUB 493, 411-440.
 FRITZ P. & FONTES J.C. (1980) - *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Vol I, Elsevier, 545 pp.
 GAT J. (1980) - *The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation*. In: «Handbook of environmental isotope geochemistry», Vol I, FRITZ P. & FONTES J.C. ed., Elsevier, 21-48.
 GONFIANTINI R., FROELICH K., ARAGUAS-ARAGUAS L. & ROZANSKI K. (1996) - *Isotopes in Groundwater Hydrology*, In: Isotope Tracers in Catchment Hydrology, Elsevier Sc. Publ., 67 pp. (sous presse).
 JOUZEL J. & SOUCHEZ R.A. (1982) - *Melting-refreezing at the glacier sole and the isotopic composition of the ice*, Journ. Glaciol., 28 (98), 35-42.
 JANIN B. (1980) - *Le Val d'Aoste: tradition et renouveau*. Musumeci, Aoste, 684 pp.
 NAKAWO M., CHIBA S., SATAKE H. & KINOUCI S. (1993) - *Isotopic fractionation during grain coarsening of wet snow*. Ann. Glaciol., 18, 129-134.
 NOVEL J.P. (1995) - *Contribution de la géochimie à l'étude d'un aquifère alluvial de montagne. Cas de la vallée d'Aoste-Italie*. Thèse de Doctorat de l'Université P. et M. Curie, Paris, 180 pp.
 NOVEL J.P., DRAY M., FERHI A., JUSSERAND C., NICOU D., OLIVE P., PUIG J.M. & ZUPPI G.M. (1996) - *Evolution des signaux isotopiques, ^{18}O et ^3H , dans un système hydrologique de haute montagne: la vallée d'Aoste*. Rev. Sc. de l'eau (soumis à).
 PARRIAUX A., DUBOIS J.D. & DRAY M. (1990) - *Chemical composition of snow cover on the western Swiss Alps*. In «Hydrology in mountainous regions. I-Hydrological measurements; the water cycle», IAHS Publ. 193, 501-509.
 POLLICINI F. (1994) - *Geologia ed idrogeologia della piana di Aosta*. Fac. Sc. M.F.N., Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università di Torino, 226 pp. (inedita).
 RAVELLO M. (1992) - *L'applicazione della idrologia isotopica agli studi di alcuni ghiacciai della Valle d'Aosta*. Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università di Torino, 105 pp. (inedita).
 ROSSO M. (1987) - *Glaciologia chimica ed isotopica*. Fac. Sc. M.F.N., Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università di Torino, 169 pp. (inedita).
 ZUPPI G.M., FONTES J.C. & LETOLLE R. (1974) - *Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le Latium*, In: «Isotope technique in groundwater hydrology, 1974» IAEA, Vienne, STI/PUB 373, 341-361.