

**Évacuation de matière dissoute dans un petit bassin
appalachien (Québec méridional) : implications
géomorphologiques**
**Exportation of Dissolved Matter from an Appalachian
Watershed, Southern Québec**
**Abtransport von aufgelöstem Material in einem kleinen
Appalachen-Becken (südliches Québec): geomorphologische
Zusammenhänge**

Pierre Clément

Volume 47, numéro 1, 1993

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032934ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032934ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Clément, P. (1993). Évacuation de matière dissoute dans un petit bassin appalachien (Québec méridional) : implications géomorphologiques. *Géographie physique et Quaternaire*, 47(1), 101-110. <https://doi.org/10.7202/032934ar>

Résumé de l'article

Une série de huit années d'observations effectuées dans un petit bassin-versant des Appalaches estriennes permet d'établir des bilans d'exportation de produits dissous de part et d'autre de la zone principale d'inflexion des versants. Ces bilans, obtenus dans un relief d'érosion différentielle modéré, montrent que la perte totale de l'aval est au moins cinq fois plus importante en conditions actuelles de végétation hétérogène et supérieure à trois si on suppose le climax forestier réalisé; le transfert depuis l'amont ne l'emporte que dans les cas de Al et Fe en raison de la podzolisation plus intense. Cet avantage, qui tend à accroître les dénivellations entre les ensembles lithologiques, est le résultat de conditions favorisant la météorisation et la dissolution en aval : plus grande abondance de matériel altérable, épaisseur plus forte de dépôts meubles, durée d'humectation plus longue par des eaux généralement agressives. Cette situation est remplacée dans le cadre de l'évolution postglaciaire de la météorisation.

ÉVACUATION DE MATIÈRE DISSOUE DANS UN PETIT BASSIN APPALACHIEN (QUÉBEC MÉRIDIONAL): IMPLICATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES

Pierre CLÉMENT, Laboratoire rhodanien de géomorphologie, URA 260, Université de Lyon 2, P.P. 11, 69676 Bron Cedex, France

RÉSUMÉ Une série de huit années d'observations effectuées dans un petit bassin-versant des Appalaches estriennes permet d'établir des bilans d'exportation de produits dissous de part et d'autre de la zone principale d'inflexion des versants. Ces bilans, obtenus dans un relief d'érosion différentielle modéré, montrent que la perte totale de l'aval est au moins cinq fois plus importante en conditions actuelles de végétation hétérogène et supérieure à trois si on suppose le climax forestier réalisé; le transfert depuis l'amont ne l'emporte que dans les cas de Al et Fe en raison de la podzolisation plus intense. Cet avantage, qui tend à accroître les dénivellations entre les ensembles lithologiques, est le résultat de conditions favorisant la météorisation et la dissolution en aval: plus grande abondance de matériel altérable, épaisseur plus forte de dépôts meubles, durée d'humectation plus longue par des eaux généralement agressives. Cette situation est replacée dans le cadre de l'évolution postglaciaire de la météorisation.

ABSTRACT *Exportation of dissolved matter from an Appalachian watershed, southern Québec.* Dissolved matter outputs are estimated from an eight year period of field observations in a small Appalachian watershed representative of the Eastern Townships physiographical conditions (rock-controlled residual hills and plateaus). Mass budgets are established for slope sequences above and below the slope inflexion zone. Total output from the downstream section is at least five times the upstream value under present heterogeneous vegetation cover, and would be three times larger if climax conditions were supposedly achieved; releases of Al and Fe are however larger on the upper sequence due to more intense podzolization. This difference which should lead to increasing elevation differences between the two sections of the slope results from downstream characteristics such as higher weatherable mineral content, thicker surficial deposits, and longer soil humidification under rather aggressive water conditions. The present situation is considered in the context of post-glacial weathering evolution.

ZUSAMMENFASSUNG *Abtransport von aufgelöstem Material in einem kleinen Appalachen-Becken (südliches Québec): geomorphologische Zusammenhänge.* Beobachtungen, die acht Jahre lang in einem kleinen Flußbecken der Appalachen durchgeführt wurden, lassen die Abtransportbilanzen von aufgelöstem Material diesseits und jenseits der Hauptneigungszone der Talhänge bestimmen. Diese in einem gemäßigten Relief mit Differentialerosion gewonnenen Bilanzen zeigen, daß der gesamte Verlust im talabwärts gelegenen Teil mindestens fünf mal bedeutender war unter gegenwärtigen Bedingungen heterogener Vegetation und drei mal höher, wenn man annimmt, daß die Bewaldungsklimax erreicht wurde; der Transfer vom oberen Teil aus war nur für Al und Fe größer wegen der intensiven Podsolisierung. Dieser Vorteil, der zur Vergrößerung der Höhenunterschiede zwischen den lithologischen Einheiten beiträgt, ist auf für die Verwitterung und Auflösung talabwärts günstige Bedingungen zurückzuführen: größerer Gehalt an verwitterungsfähigem Material, größere Dicke von losem Ablagerungsmaterial und längere Benetzungsdauer durch im allgemeinen aggressives Wasser. Diese Situation ist in den Rahmen der postglazialen Entwicklung der Verwitterung gestellt.

INTRODUCTION

Les faibles altitudes et dénivellations des régions de plateforme ancienne confèrent à leurs interfluves une évolution lente dans laquelle l'érosion chimique est prépondérante si le climat est suffisamment humide. La région estrienne, où l'ablation chimique moyenne se situe entre 10 et 15 m.10⁻⁶a pour le haut bassin de la rivière Saint-François, en est un exemple même si l'exportation fluviale de produits solides dépasse en masse par unité de superficie l'évacuation dissoute (Clément, 1989). Mais cette supériorité, valable pour les artères de rang hiérarchique élevé, est trompeuse: les masses transportées proviennent en très vaste majorité du voisinage immédiat des talwegs (Carson et al., 1973;

Clément, 1989). La définition de la morphogénèse actuelle impose en effet de connaître aussi l'origine spatiale des produits sans omettre de placer ces faits dans l'évolution géomorphologique. Plusieurs obstacles se dressent, tels que multiplicité et inégale vitesse des processus, complexité de la topographie et des héritages morphoclimatiques, ce qui amène à user de schématisations spatiales et temporelles. Ainsi, à partir de données recueillies durant huit années, l'évolution présente est estimée dans le cadre d'un petit bassin-versant en comparant les exportations chimiques d'amont et d'aval.

SITE

Le bassin-versant étudié (fig. 1 et 2), de taille kilométrique, représente les conditions physiographiques des Appalaches

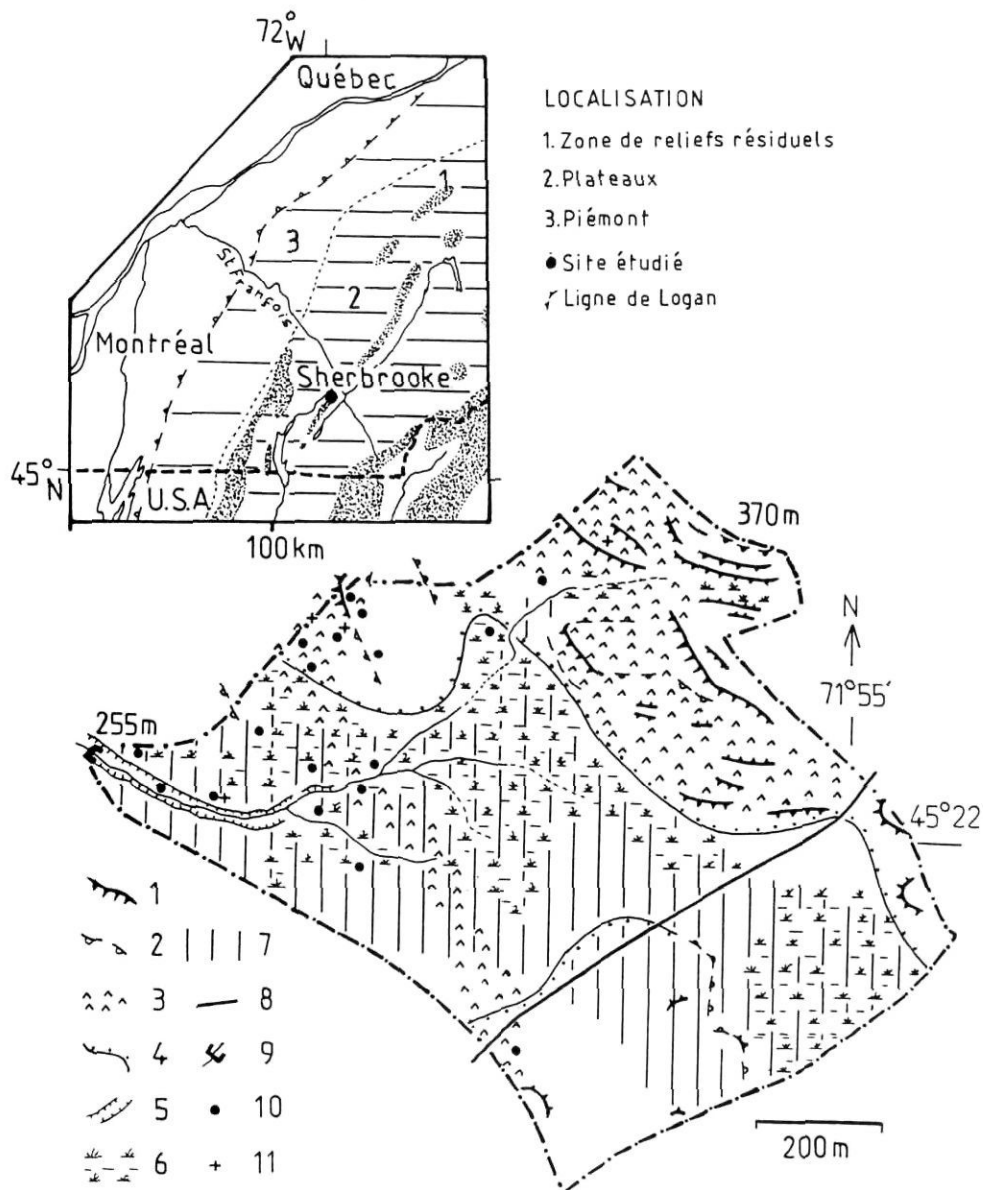


FIGURE 1. Caractéristiques du bassin étudié.
Location map and characteristics of the studied area.

1) Abrupt rocheux; 2) abrupt rocheux masqué; 3) substratum surtout rhyolitique et ophiolitique; 4) zone d'inflexion principale du versant; 5) incision en dépôts meubles; 6) zone à drainage lent; 7) zone où les horizons superficiels sont les plus saturées en cations basiques; 8) route; 9) site de jaugeage; 10) drains et extracteurs; 11) parcelles

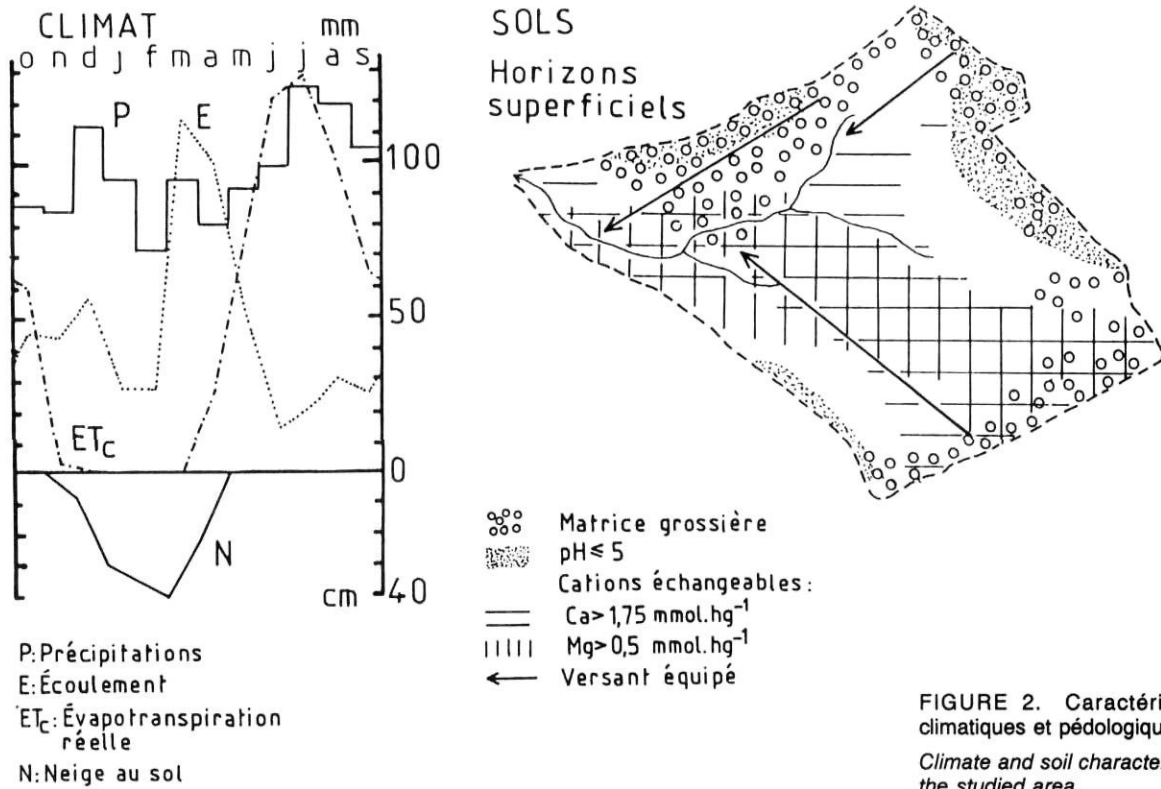


FIGURE 2. Caractéristiques climatiques et pédologiques.
Climate and soil characteristics of the studied area.

dans la région de Sherbrooke où le relief s'organise en plateaux dominés par des axes de reliefs résiduels (tabl. I). Un alignement de collines, ici principalement constitué de roches rhyolitiques et ophiolitiques, s'élève au dessus des phyllades qui forment le substratum d'un élément de plateau en amont du confluent de la rivière Magog. Une couverture de till de Lennoxville masque les irrégularités du substratum, qui apparaît cependant dans l'entaille du ruisseau; son épaisseur croît de moins de 0,5 à 3-4 m en aval. Ce till, qui constitue directement la roche mère des sols, dérive essentiellement du substratum local ou voisin (l'aval topographique correspondant ici à l'amont glaciaire du stade); il peut être assimilé d'un point de vue pédologique à une altérite mixte, d'origine mécanique en raison de sa fraîcheur. Celle-ci est traduite dans la fraction < 2 mm par les compositions minéralogique (présence abondante de grains polyminéraux) et chimique (% moyens: SiO₂ = 75,47, Al₂O₃ = 12,06, FeO = 1,49, Fe₂O₃ = 3,51, CaO = 1,02, MgO = 1,32, K₂O = 2,18, Na₂O = 2,07; détermination par dosage par fluorescence-X après fusion au métaborate de lithium). Sa matrice est généralement limoneuse (moyennes des fractions fines: 2-0,5 mm = 46 %, 500-2 μm = 43 %, < 2 μm = 11 %; déterminations par tamisage à sec et densimétrie pour la fraction < 50 μm); elle emballé de nombreux blocs et galets dont la fréquence superficielle augmente vers l'amont topographique. Ce till est, notamment aux profondeurs considérées, compact et imperméable (densité apparente voisine de 2; macroporosité faible à très faible de l'ordre de 3 %) avec des structures massive ou lamellaire.

Le climat, de type tempéré continental humide (fig. 2), se caractérise par l'intervention séquentielle de masses d'air

TABLEAU I
Caractéristiques topographiques comparées

Bassin Lithologie	Altitude (m)		Pente (°)	
	Moyenne	Étendue	Moyenne	Étendue
Local	309	331-286	6,3	11-2,7
Saint-François	322	448-232	3,0	7-0,6
- ophiolites et rhyolites	363	483-272	5,5	14-1
- détritique fin	246	284-213	2,2	5-0,7

d'origines septentrionale et tropicale en toutes saisons. Le rythme thermique oppose des hivers rigoureux mais irréguliers (redoux et pluies intervenant dans les périodes froides) et des étés brefs mais tièdes et humides (avec précipitations de haute intensité pouvant dépasser 50 mm.h⁻¹). L'apport hydrique se répartit assez également et comporte une part neigeuse voisine du quart. La précocité et l'épaisseur du manteau nival s'opposent à la pénétration du gel dans le sol qui demeure le plus souvent légèrement au dessus du point de congélation surtout sous forêt; des ségrégations de glace plus importantes peuvent s'installer en espace ouvert où vent et sublimation limitent l'accumulation neigeuse.

Les sols dérivés du till (tabl. II) se répartissent selon la toposéquence régionale (De Kimpe *et al.*, 1972): podzols humo-ferriques, les plus désaturés, sur les hauts de versant passant aux luvisols et aux gleysols vers l'aval selon le drainage externe. L'imperméabilité et la compacité du till sont

TABLEAU II

Caractéristiques pédologiques (étendues)

Horizons		Ah-Ap	Ae	Bf-Bt	C-BC
C organique %	a)	4-9	2-3	0,5-1,5	< 0,5
	b)	2-5	0,2-1	0,2-0,5	< 0,4
pH	a)	3,8-4,5	4,7-5	5-5,6	5,9-6,8
	b)	5-6	5,7-6	6,1-6,5	6,6-6,8
C.E.C. meq·hg ⁻¹	a)	16-36	13-14	12-16	6-9
	b)	6-19	6-8	6,5-8	4-6
Taux de saturation %	a)	4-18	7-9	6-10	28-74
	b)	18-36	20-34	25-44	54-89
Fe + Al _{pyr} %	a)	1,0-1,6	0,3-0,8	0,9-1,8	< 0,1
	b)	0,4-0,8	0,2-0,4	0,1-0,3	< 0,2
Rapport Ah-Ae ou Ap/C ou BC					
Feldspaths/Quartz	a)	0,32-0,5		b) 0,48-0,80	
Illite/Quartz	a)	0,37-0,40		b) 0,49-0,77	

a) Podzols. b) Luvisols gleyifiés et gleysols. Déterminations: Carbone organique par dosage de bichromate de K en milieu sulfureux concentré par le sel de Mohr. pH par électrométrie d'une suspension sol-eau distillée bouillie 1/2,5. Capacité d'échange des cations sur sol tamisé à 2 mm par saturation en CaCl₂, déplacement par NaCl et dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique; somme des cations échangeables par percolation lente à l'acétate d'ammonium N à pH 7 et dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique.

accrues, surtout sur les segments d'amont et intermédiaires, par l'existence d'horizons C fragiques qui influent sur le mode d'écoulement des eaux selon le secteur de versant et facilitent l'engorgement temporaire des horizons superficiels. Ces niveaux de discontinuité contribuent à freiner l'extension verticale des processus de podzolisation et de lessivage bien que ceux-ci soient décelables dans tous les horizons superficiels mais sur des tranches de plus en plus réduites vers l'aval. L'altération débutante affecte surtout les minéraux ferromagnésiens et moins les plagioclases (ici surtout l'albite), mais se différencie selon la position topographique: les horizons A et B de ces derniers incluent de la smectite et de la kaolinite (détermination par diffraction de rayons X sur agrégats orientés avec radiation au Cu sur agrégats orientés après traitements multiples) dont les quantités diminuent en passant vers des profils de plus en plus gleyifiés où la part de l'illite et des minéraux leucocrates croît corrélativement (Bouchard, 1983; Clément, 1989). La comparaison des rapports feldspaths/quartz et illite/quartz de la fraction < 2 µm entre surface et profondeur (tabl. II) montre aussi la plus forte disparition relative des minéraux les plus instables dans les podzols. Les pertes en éléments dissous par météorisation dépendent de plusieurs facteurs tels que le processus pédogénétique dominant, la composition originelle du till et la phase granulométrique considérée. Ainsi pour l'ensemble de la matrice inférieure à 2 mm, les podzols montrent une forte perte relative en fer, potassium et magnésium conforme à la destruction de minéraux phylliteux; l'ordre de mobilité est

TABLEAU III

Caractéristiques des secteurs contributants

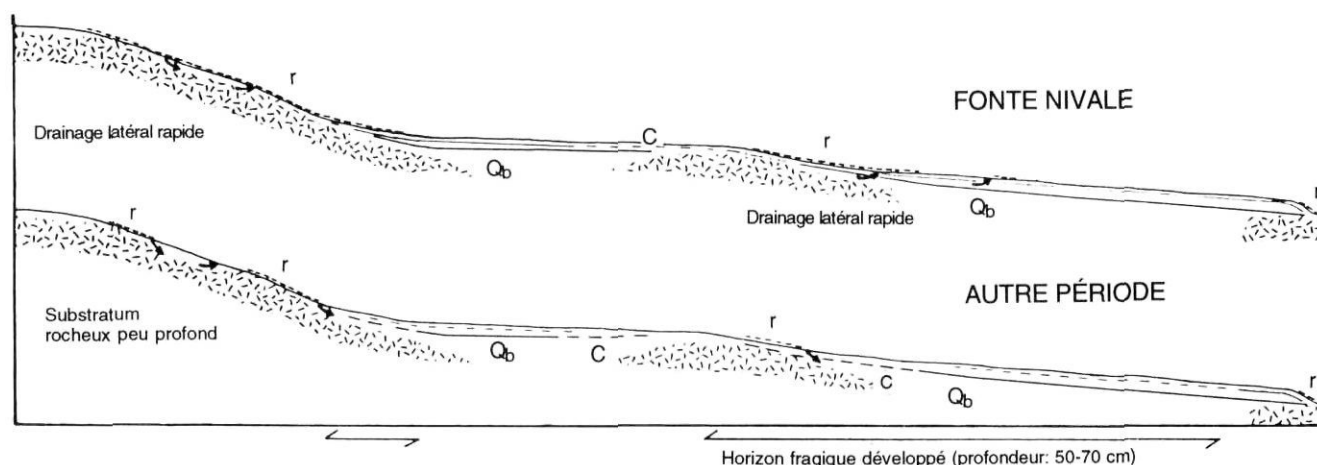
Caractéristiques	Amont (0,360km ²)	Aval (0,388 km ²)
Pentes les plus fréquentes	4 à 16°	4 à 8
Substratum		
– rhyolitique	34 %	12 %
– ophiolitique	21 %	0
– métapyroclastique et rhyolitique	45 %	60 %
– Phyllades	0 %	28 %
Forêt	53 %	27 %
– conifères dominants	28 %	17 %
– feuillus dominants	32 %	63 %
– mixte	40 %	20 %
Prairie	47 %	73 %
– mal drainée	4 %	37 %
– bien drainée	96 %	63 %

moins typé dans les autres sols en raison de la rémanence plus marquée de minéraux fragiles.

MÉTHODES

Le bassin est simplement divisé de part et d'autre de la zone d'inflexion principale séparant les sections convexes élevées des versants de leurs bases à concavité développée dans laquelle le ruisseau est incisé, ceci afin de distinguer les contributions respectives des deux sous-ensembles (tabl. III). De manière générale, le secteur d'amont porte des sols dont les horizons supérieurs sont plus grossiers, plus désaturés et plus acides (fig. 2).

L'érosion due au ruissellement a été observée sur parcelles témoins de 6 à 15 m de long, placées sous couverts forestier (N = 3) et herbacé (N = 2) sur des pentes entre 10° et 15°. En dehors de la fonte nivale où ils atteignent 30-40 %, les coefficients d'écoulement se situent entre 1 et 10 % et les sédiments recueillis entre 1 et 6 g·m⁻²·a⁻¹. L'installation de parcelles sur des pentes plus faibles n'a pas été jugée nécessaire en raison de la faiblesse des apports relevés durant la phase préliminaire d'observation; ceux-ci y sont présumés proportionnels au sinus de l'inclinaison. Sur les pentes supérieures à 10° qui constituent le cinquième de l'aire du bassin, d'un quart à la moitié des eaux ruisselées le sont en mars-avril lors de la fonte nivale; les pluies intenses d'été entraînent ce phénomène, surtout sur les pentes supérieures à 14° des collines. Ses modalités spatiales, schématisées par la figure 3, ont également été établies par confrontation avec les hydrogrammes de crue du cours d'eau. Le drainage interne et externe est plus rapide en amont. Il s'effectue par transfert au-dessus de l'horizon fragique et du substratum rocheux. En aval de la zone d'inflexion, les eaux issues de l'amont peuvent resurgir en période d'abondance hydrique d'origine nivale ou pluviale. Les structures du till (lamellaire à feuilletée avec fissures verticales) favorisent mieux cependant l'infiltration notamment en se rapprochant de l'incision du cours d'eau. Le ruissellement réalisé sur les versants les



Versant type (longueur: 1,1 km; dénivellation: 110 m)

Secteurs contribuant à l'écoulement du cours d'eau (débits de base: Q_b ; crues: C)

Eaux du sol: ===== ≤ 30 cm ———— > 30 cm. Ruissellement: r

FIGURE 3. Modèle de contribution hydrologique à l'exportation de produits dissous (d'après les compositions chimiques observées et les observations hydrologiques).

Solute exportation model (based upon observed chemical compositions and hydrological observations).

plus inclinés de l'amont ne parvient donc pas directement au talweg mais s'infiltré à partir des replats intermédiaires. Il est à noter l'impossibilité de distinguer le ruissellement superficiel du ruissellement hypodermique, notamment sur les débuts de concavité basale et en conditions de saturation généralisée. L'exportation chimique due à ces contributions correspond donc à une prise en charge dans les horizons organiques.

L'échantillonnage des eaux du sol a été effectué au moyen de drains et de tubes extracteurs à extrémité poreuse aux profondeurs de 15, 30, 60 et 90 cm (correspondant aux horizons Ah ou ancien Ap; Ae-AB; Bf ou Bt; C ou Cg). Il n'a pu être effectué en hiver: les concentrations sont alors supposées voisines de celles observées en conditions d'étiage en fin d'automne, ceci en fonction du comportement hydrologique du bassin. Durant les autres saisons, le rythme des précipitations a guidé celui des prélèvements de manière à inclure les périodes d'humectation et de dessiccation des profils. Les bilans de masse sont établis à partir des concentrations moyennes annuelles, ainsi pondérées par la fréquence de l'humectation des divers sites. Les apports atmosphériques ont été estimés par analyse des eaux recueillies par des collecteurs ouverts en permanence afin de capter aussi les retombées sèches ainsi que des couches de neige en fonction de leur chute; leur masse annuelle totale est d'environ $7 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (5,8 en excluant les nitrates) pour la période d'observation. Celle-ci, de durée égale à huit années consécutives, représente convenablement les conditions actuelles en raison de la faible variation interannuelle du climat tempéré continental humide (le coefficient de variation pour les précipitations en est de 13 % pendant la période d'observation).

Les déterminations des produits dissous dans les eaux ruisselées et internes ainsi que dans le cours d'eau (au site de jaugeage) ont été effectuées selon les méthodes sui-

TABLEAU IV

Exportation dissoute annuelle depuis le secteur amont entre 0 et 60 cm de profondeur (kg)

	Ruissellement	Lessivage	Total
Al	1,4 (16 %)	7,1	8,6
Fe	2,1 (9 %)	20,5	22,6
Ca	82 (13 %)	568	650
Mg	22 (59 %)	212	234
K	51 (31 %)	115	166
Na	14 (9 %)	148	162
HCO ₃	169 (9 %)	1727	1896
Cl	64 (25 %)	189	253
SO ₄	153 (12 %)	1172	1324
SiO ₂	39 (5 %)	703	742
Total	635,5 (11 %)	4927,6	5563,2

vantes: spectrophotométrie d'absorption atomique pour le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium, titrage pour l'alcalinité et les chlorures, turbidimétrie pour les sulfates et colorimétrie pour le fer, l'aluminium et la silice. Les résultats ont été utilisés après vérification des équilibres ioniques. Les compositions chimiques des tissus végétaux et des litières ont été déterminées par les laboratoires du ministère de l'Agriculture du Québec et d'Agriculture Canada (séchage à l'étuve à 70° durant 24 h; spectrophotométrie d'absorption atomique pour Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, SiO₂; turbidimétrie pour S; méthode de Nessler pour N)

L'EXPORTATION DANS LE SECTEUR AMONT

L'exportation chimique s'établit à partir des composantes suivantes (tabl. IV):

- La part ruisselée est déterminée en proportion des résultats obtenus sur les diverses parcelles témoins couvertes avec

correction pour les espaces sous feuillus en fonction de la composition chimique des tissus végétaux, plus riches en ce cas en Ca, Mg, K et Si (Clément, 1989). Elle est relativement moins faible pour K, Cl et NO₃, produits d'origine fortement atmosphérique ou organique.

- La part lessivée entre 0 et 60-70 cm, profondeur des drains et extracteurs les plus couramment utilisables dans les faibles épaisseurs de till, est calculée en utilisant les concentrations moyennes annuelles et le volume infiltré selon la relation $V_i = V_p - V_{ET} - V_R$ (respectivement les volumes infiltré, précipité, évapotranspiré calculé selon la méthode de Thornthwaite, et ruisselé).

Dans les segments à pente forte, la lame infiltrée moyenne est de 400 mm, compte tenu de la pluviosité et du ruissellement plus intenses observés; dans la partie de pente moyenne, elle est de 425 mm. Les concentrations en produits dissous sont les moyennes pondérées par la profondeur des tubes extracteurs.

- Les sous-écoulements au dessous de 60-70 cm ne sont pas caractérisés, mais ils se limitent à l'aval de deux vallons de faible superficie représentant environ 7 % de la superficie du bassin.

Une partie des produits est accumulée dans la matière végétale puisque l'état climacique n'est pas réalisé dans l'ensemble du bassin, ce que reflète l'extension de *Populus tremuloides*, et doit être considérée dans le bilan d'altération. Son estimation (tabl. V) repose pour la forêt sur une accumulation maximale annuelle de 2600 kg·ha⁻¹ de matière sèche, valeur observée dans une forêt nord-appalachienne en conditions climatiques semblables (Whittaker et al., 1974; Gosz et al., 1976), et une composition chimique moyenne pondérée selon les types de couverts végétaux (tabl. V); l'accumulation est plus faible, de l'ordre de 350 à 400 kg/ha, en prairie (Siccama et al., 1970). Le bilan (tabl. VI) s'établit selon les relations:

$$T = R + L \text{ et } S = T + F - A,$$

où R et L sont les masses ruisselée et lessivée, T le transfert total vers l'aval, A l'apport atmosphérique, F la masse fixée

TABLEAU V
Teneurs moyennes des feuillages (mg·hg⁻¹)

	Conifères	Feuillus	Prairie
Al	15-45	5	4-5
Fe	24-26	6-28	10-15
Ca	320-960	540-1480	90-720
Mg	83-151	129-335	105-148
K	370-840	600-1150	360-1780
Na	1,5-3,8	2,4	1,8-2,6
S	94-14	68-118	115-175
Si	120-480	180-420	180-1368

Végétaux analysés: *Picea glauca* et *P. mariana*. *Tsuga canadensis*, *Pinus resinosa* et *P. strobus*. *Populus tremuloides* et *Acer saccharum*. Graminées diverses, *Solidago graminifolia* et *S. rugosa*, herbes hygrophiles.

par la végétation et S la perte nette du sol. Les nitrates ne sont pas inclus dans les bilans, car ils sont en grande majorité accumulés par les organismes vivants à partir du réservoir atmosphérique. Pour les autres produits, la perte du sol est d'origine minérale, directement ou indirectement, puisque ce secteur n'est pas affecté par des apports artificiels autres que ceux inclus dans les retombées atmosphériques.

L'EXPORTATION DANS LE SECTEUR AVAL

La caractérisation de l'exportation dans le secteur aval (tabl. VII) est moins aisée: la part du ruissellement ne peut y être quantifiée en l'absence de parcelles représentatives des pentes faibles. Le flux ruisselé inclut ici l'apport d'amont et les résurgences d'eaux infiltrées plus haut, comme on le constate au printemps. L'infiltration atteint des profondeurs supérieures aux tubes extracteurs les plus longs; le flux lessivant parcourant le premier mètre peut également être affecté par les eaux d'amont. Enfin des apports anthropiques terrestres peuvent provenir d'une route et d'une exploitation agricole à l'extrémité orientale du bassin. Pour ces raisons, le transfert vers le ruisseau (Tr) ainsi que la perte nette du sol regroupent les divers niveaux d'évacuation et le bilan d'aval est calculé de la manière approchée suivante:

$$Tr = E - (T + A),$$

où Tr = E - (T + A + H) et S = Tr + F, où T est la masse transférée de l'amont, A l'apport atmosphérique, F la fixation

TABLEAU VI
Bilan annuel de l'amont (a en kg·b en kg·km⁻²)

		T	F	A	S
Al	a	9	6,6	4	11,6
	b	24	18	11	32
Fe	a	23	12	17	28
	b	63	33	46	77
Ca	a	649	518	283	884
	b	1803	1439	786	2455
Mg	a	235	101	22	314
	b	653	280	61	872
K	a	166	403	112	457
	b	461	1120	311	1269
Na	a	162	1,1	94	69
	b	450	3	261	192
HCO ₃	a	1896		612	1284
	b	5267		1700	3567
Cl	a	253		175	78
	b	703		486	217
SO ₄	a	1324	159	664	819
	b	3678	442	1844	2275
SiO ₂	a	742	303	122	923
	b	2061	842	339	2564
Total (t)	a	5,46	1,51	2,11	4,87
	b	15,16	4,18	5,85	13,52

T: masse transférée vers l'aval. F: fixation végétale. A: apports atmosphériques. S: perte nette du sol.

végétale, H l'apport anthropique, Tr le transfert depuis le secteur aval vers le ruisseau, E l'exportation par le cours d'eau et S la perte nette du sol (au sens large).

La contribution anthropique à l'évacuation est difficile à chiffrer faute de comptabilité précise des épandages et surtout en raison de la connaissance imprécise de la part fugace. L'utilisation agricole concerne ici une superficie de 20-25 ha, dont une moitié en pâtures occasionnellement chaulées, à l'amont oriental du bassin. L'estimation du calcium libéré se fonde sur la comparaison statistique de divers bassins estriens d'occupation humaine inégale (Clément, 1989); celle du potassium sur les données des services agricoles et un relâchement de l'ordre des deux tiers ordinairement admis. La contribution en sodium des épandages routiers dérive également de comparaisons effectuées dans le bassin de l'Eaton entre bassins de densité routière variée en considérant le caractère secondaire de la route. Celle-ci étant à l'époque des observations sans revêtement asphalté, il faut aussi tenir compte de l'usage de durcisseur en été: on suppose que la moitié du calcium d'origine artificielle lui revient et correspond à une partie des chlorures, l'autre étant liée au sodium. Le reliquat de calcium dû aux pratiques agricoles est supposé

combiné à HCO₃⁻. Le total des chlorures ainsi évalué est de valeur unitaire voisine de celle observée dans d'autres bassins estriens (Clément, 1989).

DISCUSSION

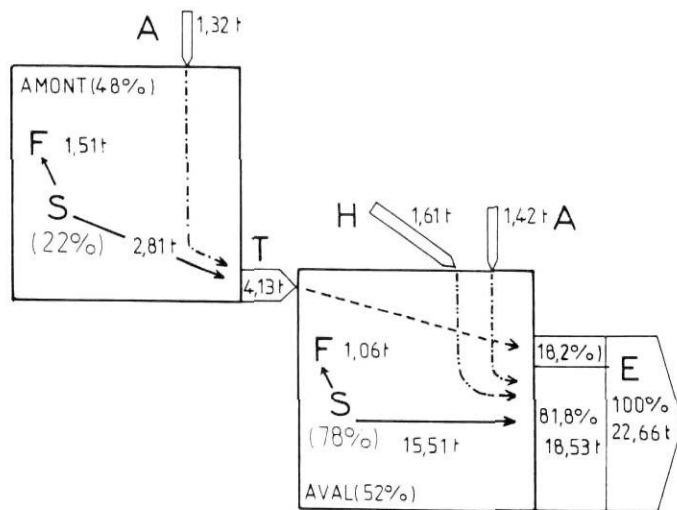
Malgré l'approximation des apports anthropiques, les pertes sont supérieures en aval. L'évacuation annuelle brute de matière par kilomètre carré est 5,3 fois plus forte dans ce secteur (80,3 t contre 15,2 à l'amont) et l'évacuation nette totale, apports externes déduits, 7,2 fois plus importante (67,1/9,3 t). Si on se limite aux produits d'origine minérale locale en excluant Cl et la partie des bicarbonates provenant du CO₂ atmosphérique (Meybeck, 1979), on obtient respectivement (fig. 4) un rapport de 4,2 pour l'évacuation brute (47,8/11,5) et de 5,1 pour l'évacuation nette (40,0/7,8). L'écart est vraisemblablement un peu moins ample car l'estimé de l'amont n'inclut pas les apports profonds circulant dans les petits vallons affluents et les poches de till plus épais d'ampleur relative faible. La recolonisation forestière déclenchée par l'abandon agricole diminue l'exportation par les cours d'eau en raison de l'accumulation nette de matière végétale. Cet effet de stockage est à présent plus marqué dans les aires boisées d'amont que dans l'aval plus herbacé. Dans l'hypothèse d'un climax forestier reconstitué, dans lequel prélèvements minéraux et dégradation de la matière organique s'équilibrent, les différences de perte nette seraient diminuées. Selon l'hypothèse retenue, la fixation végétale annuelle peut atteindre 4,2 t·km⁻² en amont et 2,7 en aval (nitrates exclus). En cas d'équilibre, le rapport des pertes

TABLEAU VII
Bilan annuel de l'aval

	E	T	F	A	H	Tr	S
Al	19	9	3,2	4		6	9,2
		24	8,2	10		15	23,7
Fe	42	23	5,9	18		2	7,9
		6,3	15,2	46		4	20,4
Ca	4764	649	248	305	400	3414	3662
		1803	639	786	1031	8799	9438
Mg	1980	235	60	24		1722	1782
		653	154	61		4438	4593
K	1220	166	228	121	450	483	711
		461	587	311	1160	1245	1832
Na	902	162	1	101	500	139	140
		450	2,6	261	1289	358	361
HCO ₃	20193	1896		660	600	17037	17037
		5267		1700	1546	43910	43910
Cl	2459	253		189	900	1117	1117
		703		486	2320	2879	2879
SO ₄	3197	1324	124	715		1158	1282
		3678	320	1844		2985	3304
SiO ₂	1847	742	389	132		973	1393
		2061	1003	339		2508	3590
Total	36,63	5,46	1,06	2,27	2,85	26,05	27,11
(t)		15,16	2,73	5,85	7,35	67,14	69,87

Notes: La première ligne (en kg) s'applique au secteur considéré; la seconde est ramenée à l'unité du km², sauf pour l'exportation par le cours d'eau (E) ou exportation totale du bassin.

L'absence de valeurs signifie des quantités nulles ou très faibles. T: masse transférée de l'amont. F: fixation végétale. A: apports atmosphériques. H: apports anthropiques. Tr: masse transférée vers le cours d'eau. S: Perte nette du sol.



BILAN ANNUEL MOYEN (Cl⁻, NO₃⁻ et HCO₃⁻ exclus)

- A: Apports atmosphériques (3,66 t·km⁻²)
- F: Fixation végétale (4,19 - 2,73)
- H: Apports anthropiques (4,14)
- S: Perte du sol (12,00 - 42,71)
- T: Évacuation totale (11,47 - 47,76)
- E: Exportation du bassin (30,29)

FIGURE 4. Bilan chimique comparatif (valeurs par secteur contribuant, ramenées à l'unité de surface dans l'encadré).

Comparative chemical budget (contributions from upstream and downstream sections; inset data per area unit).

minérales des deux secteurs baisserait à 3,6 à l'avantage de l'aval (42,7 et 12,0 t·km⁻²·a⁻¹).

L'amont comporte environ 30 % du volume meuble (contre 48 % de la superficie) en tenant compte de l'épaisseur et de la porosité des horizons. Sa contribution à l'évacuation par le cours d'eau dépasse cependant ce pourcentage pour Al, Fe, SO₄ et SiO₂. Cette efficacité relative peut s'expliquer par plusieurs facteurs: fréquence plus élevée de la biotite et des plagioclases impliquant une participation du substratum igné, altération plus intense des pyrites et des minéraux ferrifères en milieu plus drainant et acide. La mise en solution du fer et de l'aluminium dans les podzols est surtout effectuée dans les horizons Ah et Ae en présence de pH acides et de composés fulviques, soit de milieux favorisant la dissolution congruente des minéraux (Ugolini et Dahlgren, 1987); ceci est reflété par les fortes teneurs en Al et Fe extraits par le pyrophosphate de sodium (tabl. II) et par des concentrations

élevées de ces éléments dans les eaux du sol (respectivement entre 0,10 et 1 mg·l⁻¹ et 0,10 et 0,70 entre 0 et 30 cm contre moins de 0,1 en profondeur). Leur précipitation dans les Bf, réalisée plus profondément dans le cas de l'aluminium, n'est pas totale car les quantités d'amorphes tels que déterminés par les différences avec leur extraction à l'oxalate acide d'ammonium demeurent faibles en conditions de drainage rapide et de végétation forestière. Leur élimination des profils, au moins partielle, est donc possible (Buurma, 1987) en raison de la faible épaisseur des sols et du lessivage oblique plus intense sur les pentes relativement fortes. Dans le cas du fer, elle est facilitée par les conditions temporairement réductrices lors des phases hydromorphiques de l'automne et du printemps qui favorisent aussi l'hydrolyse (Duchaufour, 1983); ces phases correspondent en effet aux plus fortes concentrations relevées dans les eaux internes du sol.

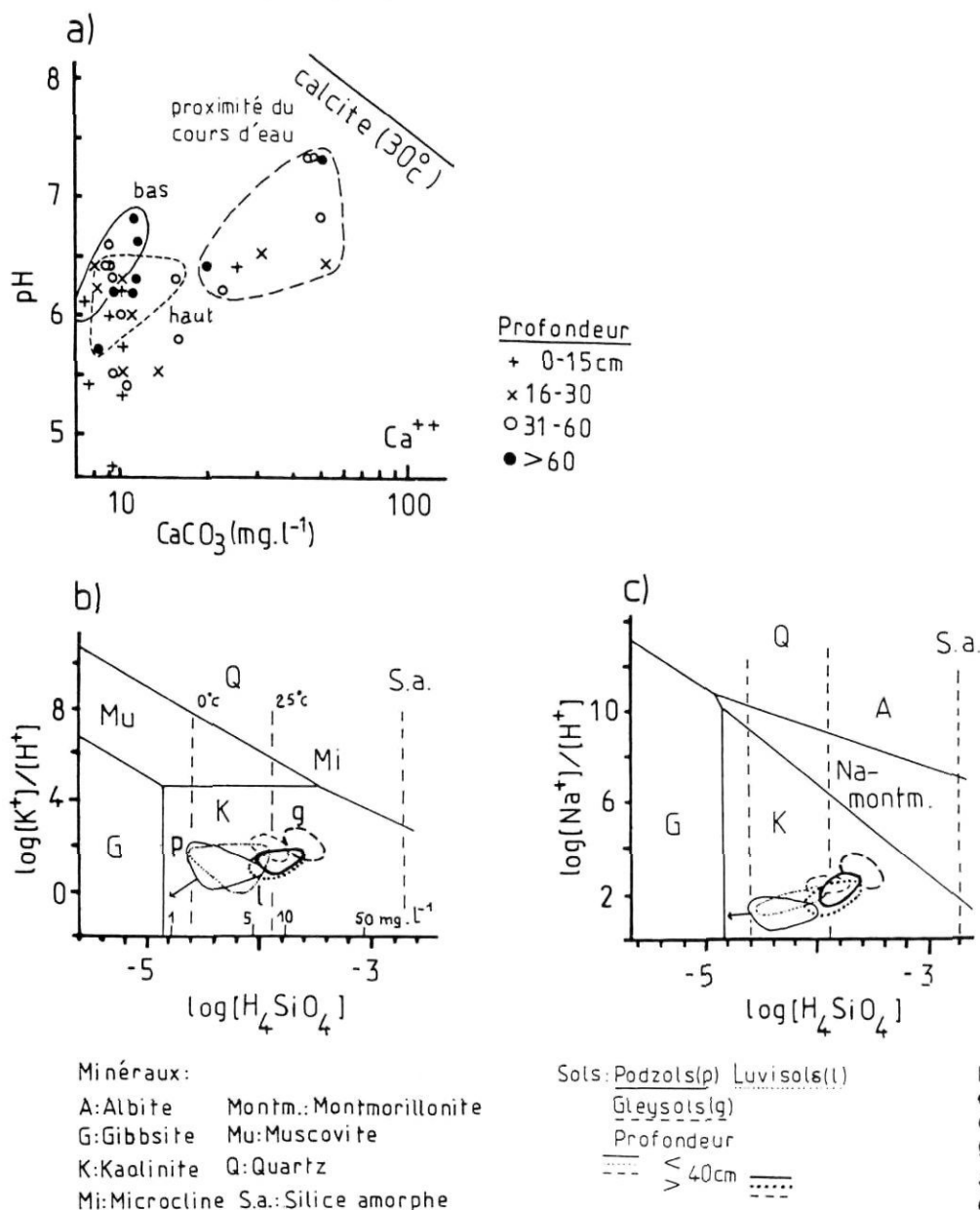


FIGURE 5. Eaux internes du sol et stabilité des minéraux: exemples. Valeurs extrêmes désignées par la flèche.
 Soil water and mineral stability diagrams.

En aval par contre, la résidence plus longue des eaux internes s'allie au maintien de leur agressivité en toutes saisons vis-à-vis de minéraux ordinaires, comme l'illustrent les diagrammes de stabilité (fig. 5 a,b,c). De fortes teneurs en fer se manifestent dans des conditions de nappe phréatique perchée sur les replats. Le rôle de la lithologie apparaît dans l'abondance du magnésium liée aux phyllades sous-jacentes dont l'influence sur le till est plus marquée dans l'axe d'écoulement glaciaire vers le sud-est et l'ensellement médian sommital; il en est de même pour le calcium provenant des sédiments du synclinorium de Saint-Victor, au nord-ouest. À cela s'ajoutent l'épaisseur des terrains meubles et l'abondance corrélative de minéraux fragiles moins altérés subsistant en profondeur, dont parfois les carbonates. L'ensemble de ces facteurs est à l'origine de la forte supériorité des pertes nettes en bicarbonates et chlorures; les eaux de l'amont sont donc

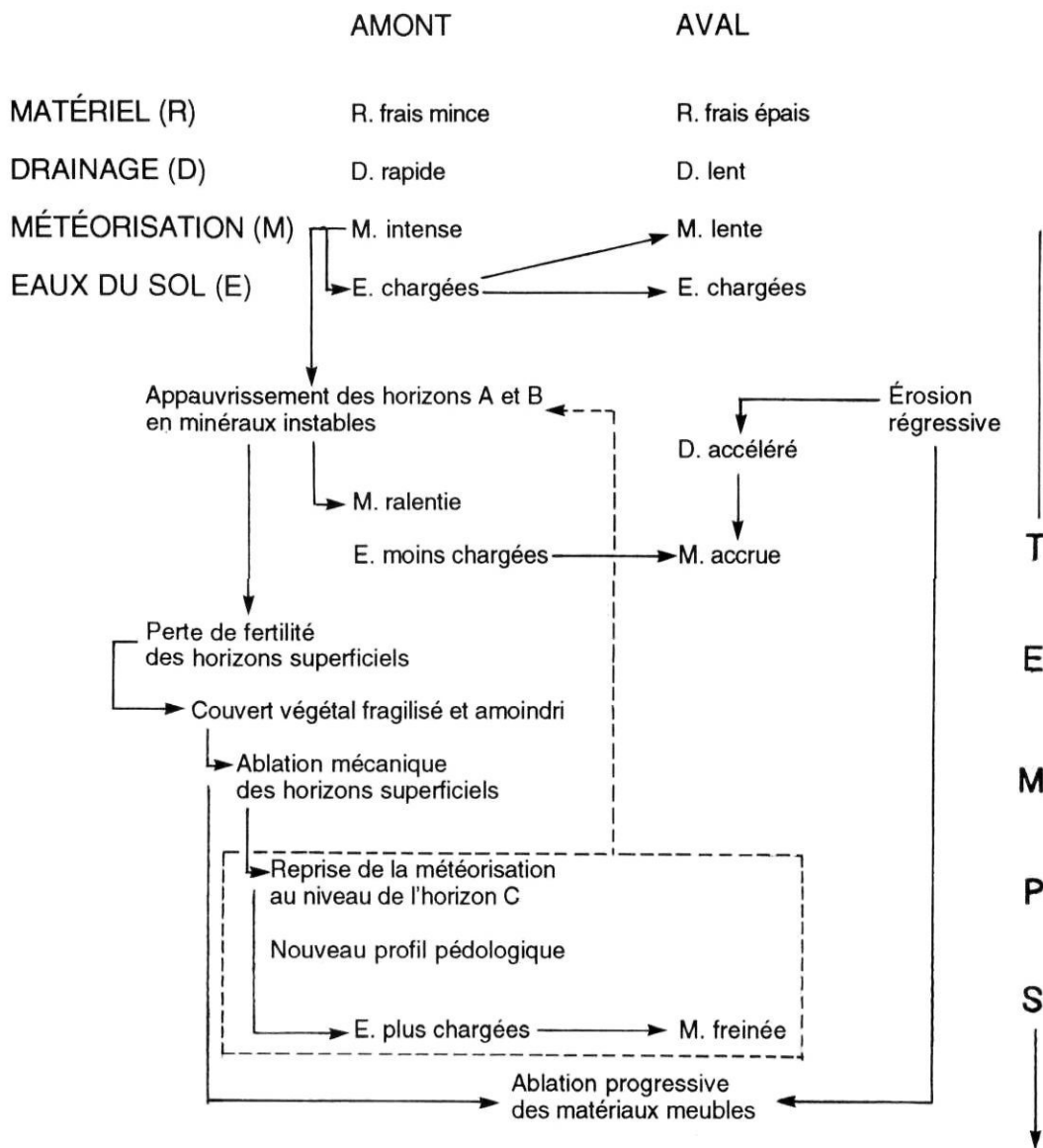
relativement plus sulfatées. Le relâchement est de valeur plus proche pour les éléments comme le sodium contenu dans des minéraux plus stables, comme ici l'albite, ou le potassium bien évacué en milieu forestier podzolisant d'amont malgré l'abrégement du temps de contact eau-sol; l'écart est limité pour la silice en raison de son abondance ubiquitaire.

ÉVOLUTION À COURT ET MOYEN TERMES

Les observations à cette échelle peuvent être extrapolées qualitativement à l'ensemble des interfluves appalachiens de conditions semblables, c'est-à-dire conditionnés par des oppositions lithologiques. Dans un climat aux précipitations abondantes et régulières, la météorisation est surtout déterminée par le taux de solubilité des minéraux (Trudgill, 1976), surtout dans le cas considéré où elle s'exerce aux dépens

TABLEAU VIII

Évolution hypothétique des conditions postglaciaires de l'exportation chimique



des minéraux frais du till et d'un substratum en grande partie débarrassé de ses altérites par les glaciers. Les pertes de matière tendent d'abord à accroître la porosité et, par tassement ultérieur, abaisser inégalement la surface d'autant que la granulométrie du till est à dominante assez grossière (50 à 70 % de la matrice est $>20 \mu\text{m}$). Elles affectent aussi le substratum rocheux comme le montre l'étude des charges dissoutes dans plusieurs bassins estriens (Clément, 1989). L'accentuation des dénivellations altitudinales s'effectue en fonction des oppositions lithologiques où les roches détritiques fines et carbonatées sont les plus sensibles en conditions aussi humides. Si ces déductions sur la part de l'ablation chimique s'accordent aux conditions présentes, elles ne peuvent être extrapolées sans considérer les modifications apportées au milieu depuis la déglaciation ou envisageables dans le futur (tabl. VIII). Dans tous les secteurs, la météorisation et l'exportation sous forme dissoute tendent à ralentir avec le temps, en raison de la disparition progressive des minéraux les plus instables (dissolution incongruente redevable au mélange minéralogique du till). L'évolution présumée est sous l'emprise du décalage initial de l'intensité de la météorisation entre l'amont et l'aval et du retard de l'érosion régressive gagnant les interfluves des plateaux à partir des vallées majeures. Mais la météorisation superficielle peut être relancée par l'ablation des horizons désaturés qui est plus probable sur les pentes fortes d'amont; cette autorégénération est liée à la fragilisation de la végétation sur des sols de plus en plus pauvres qui la rendent plus sensible aux maladies et aux incendies. L'aval est de son côté influencé par les incisions verticales des cours d'eau qui accélèrent le drainage et le transport des produits dissous. Une partie de l'exportation chimique se faisant aux dépens du substratum, ce dernier voit donc se développer des altérites débutantes sur des épaisseurs dépendant de la résistance aux processus chimiques: ainsi l'altération de minéraux instables dans un granite, tels que plagioclases, biotite, apatite, peut avoir éliminé leurs cations basiques sur des tranches allant de quelques centimètres au mètre, ceci depuis la déglaciation; l'arénisation peut avoir gagné des tranches d'ordre décimétrique (Clément, 1989). Les terrains sédimentaires des interfluves, fracturés sur des épaisseurs allant jusqu'à 40 m (Simard, 1970) en raison à la fois de leur tectonisation héritée et des effets des recouvrements d'inlandsis, sont encore plus sensibles aux actions de l'eau. Ces altérites prendront donc le relais des dépôts glaciaires peu à peu éliminés, mais se maintenant plus longtemps sur les replats intermédiaires.

CONCLUSION

Dans l'exemple considéré, la perte en produits dissous est nettement plus accusée dans les secteurs d'aval dans un rapport de 4 à 5 si on considère la perte minérale nette. Ce rapport se réduit à 3,4 si on suppose réalisées des conditions de végétation uniformément climaciques. Il est le résultat du cumul de facteurs favorables tels que la durée de l'humectation (donc du contact avec les particules altérables), l'épaisseur des dépôts meubles et la présence d'un substratum plus sensible à la météorisation. L'abondance et la fréquence des précipitations empêchent le facteur limitant de la saturation

des solutions d'autant que l'incision du cours d'eau autorise un drainage latéral. La succession saisonnière accentuée alternativement les processus: les eaux froides favorisent la mobilisation des carbonates en profondeur alors que le réchauffement estival accélère l'altération superficielle. De manière qualitative générale, les processus chimiques accentueront donc les dénivellations altitudinales en correspondance avec la sensibilité des diverses lithologies aux actions de climats humides. L'accusation des contrastes topographiques limitera cependant cette évolution en raison de la relance des processus mécaniques sur des pentes supérieures raidies dont la protection végétale sera probablement fragilisée par l'appauvrissement des sols.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont aux lecteurs de la revue qui ont bien voulu corriger cet article, ainsi qu'aux organismes qui ont permis cette recherche: Conseil des arts du Canada, Conseil national de recherche du Canada, ministère de l'Éducation du Québec et Université de Sherbrooke.

RÉFÉRENCES

- Bouchard, M., 1983. Influences stationnelles sur l'altération chimique des sols dérivés de till (Sherbrooke, Qué., Canada). *Catena*, 10: 363-382.
- Buurma, P., 1987. pH-dependant character of complexation in podzols, p. 181-186. *In* D. Righi et A. Chauvel, édit., *Podzols et podzolisation*. AFES et INRA.
- Carson, M.A., Taylor, C.H. et Grey, B.J., 1973. Sediment production in a small Appalachian watershed during spring runoff: the Eaton River Basin, 1970-1971. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 10: 1707-1734.
- Clément, P., 1989. Processus d'érosion et évolution du relief: exemples sous climats tempérés à hivers froids (Appalaches du Québec méridional; comparaison avec la Suède centrale). Th. Doctorat d'État, Université Lyon 2, 705 p.
- De Kimpe, C.R., Baril, B.W. et Rivard R., 1972. Characterization of a toposequence with fragipan: the Leeds — Ste Marie de Brompton series of soils, Province of Quebec. *Canadian Journal of Soil Science*, 52: 135-150.
- Duchauffour, P., 1983. *Pédologie. 1. Pédogénèse et classification*. Masson, Paris, 491 p.
- Gosz, J.R., Likens, G.E. et Bormann, F.H., 1976. Organic Matter and Nutrient Dynamics of the Forest and Forest Floor in the Hubbard Brook Forest. *Oecologia*, 22: 305-320.
- Meybeck, M., 1979. Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Revue de géologie dynamique et géographie physique*, 21 (3): 215-246.
- Siccama, T.G., Bormann, F.H. et Likens, G.E., 1970. The Hubbard Brook ecosystem study: productivity, and phytosociology of the herbaceous layer. *Ecological Monographs*, 40: 389-402.
- Simard, G., 1970. Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Eaton. Ministère des Richesses naturelles du Québec, H.G.2, 28 p.
- Trudgill, S.T., 1976. Rock weathering and climate: quantitative and experimental aspects, p. 59-99. *In* E. Derbyshire, édit., *Geomorphology and Climate*. Wiley, London.
- Ugolini, F.C., 1987. The mechanism of podzolisation as revealed by soil solution studies, p. 195-203. *In* D. Righi et A. Chauvel (édit.), *Podzols et podzolisation*. AFES et INRA.
- Whittaker, R.H., Likens, G.E. et Bormann, F.H., 1974. The Hubbard Brook Ecosystem Study: Forest biomass and production. *Ecological Monographs*, 44: 233-252.