

COMPORTEMENTS HYDROLOGIQUES COMPARES ET EROSION DE L'ECOSYSTEME
FORESTIER AMAZONIEN A ECEREX, EN GUYANE*

-o-

M.-A. ROCHE
Maître de Recherches principal
Service Hydrologique O.R.S.T.O.M., Paris

-|==|==|==|==|-

1 - OBJECTIFS ET PRINCIPES DES ETUDES

La Guyane, couverte sur 98% de sa superficie par la forêt tropicale humide, 90 000 km², oriente son développement économique vers l'exploitation de cette ressource naturelle considérable. En effet, dans les années à venir, le développement verra l'exploitation industrielle du bois d'oeuvre amplifiée ainsi qu'une exploitation industrielle intense de la forêt pour la fabrication de cellulose et de méthane. Par ailleurs, il s'impose que de vastes périmètres, destinés à des aménagements sylvicoles, pastoraux et agricoles soient conquis sur la forêt.

Toutefois, l'écosystème forestier guyanais qui se particularise, sous une pluviométrie annuelle de 3 à 4 mètres, par des sols peu perméables sur roches essentiellement cristallines profondément altérées et par des pentes topographiques de 15 à 50%, se prête difficilement aux techniques intensives et modernes d'exploitation.

Il risque de se créer des dégradations catastrophiques car irréversibles du plus important potentiel économique que représentent pour la Guyane la forêt et les sols, s'il n'est pas tenu compte d'impératifs scientifiques impossibles à ignorer pour assurer la pérennité de ces ressources. A ces questions se rattachent directement les modifications subies par la flore et la faune lors de la régénération de la forêt ou de l'implantation d'écosystèmes simplifiés.

Engagé en 1976, le programme de recherches ECEREX (ECoulement ou ECologie, EROsion, EXploitation) doit définir les possibilités de mise en valeur de la forêt, en assurant les objectifs scientifiques et techniques suivants :

- la connaissance de l'écosystèmes primaire ;

* Paru dans Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, Vol. XIX, n° 2 - 1982.

- la prévision et la mesure des effets de l'exploitation et de la mise en valeur des terres défrichées sur les facteurs naturels de production : évolution des sols et du bilan hydrologique, réserves génétiques, effets sur les terres dominées, etc. ;
- la définition des techniques permettant l'exploitation continue de la forêt et l'implantation d'écosystèmes simplifiés de types sylvicoles, pastoraux ou agricoles.

Le problème des nuisances, corollaire de tout développement industriel, ayant déjà été posé dans cette région pour un projet d'implantation d'usines de cellulose en bordure d'estuaires guyanais, une étude menée par l'ORSTOM a permis d'évaluer les risques de pollution liés à l'hydrodynamisme de cet écosystème (M.-A. ROCHE, 1977).

Les recherches entreprises à ECEREX présentent un caractère pluridisciplinaire requérant l'intervention de plusieurs Organismes : l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM : Hydrologie, Pédologie, Botanique, Entomologie), Groupement d'Etudes et de Recherches pour le développement de l'Agronomie Tropicale, (GERDAT : CTFT, IRFA), le Muséum (Botanique, Zoologie) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (Bioclimatologie). Cette opération constitue un volet d'un programme plus vaste intitulé "Connaissance et amélioration de la productivité de la forêt tropicale humide en Guyane", établi dans le cadre du programme MAB 1 de l'UNESCO et rattaché à l'action concertée "Gestion des ressources naturelles renouvelables" de la Délégation Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST).

Les études des différentes disciplines s'articulent autour d'une expérimentation en bassins versants comparatifs, d'une superficie de 1,0 à 1,5 hectares, et de parcelles d'une centaine de mètres carrés, situés dans une zone de micaschistes et de pegmatites fortement altérés ("Schistes de Bonidoro") (Fig. 1).

Différents modes d'aménagement, envisageables dans la zone forestière de Guyane, seront expérimentés à raison d'un par bassin ou parcelle, après une exploitation de type papetier (Fig. 2) :

1. recrû naturel sans brûlis,
2. recrû naturel après brûlis,
3. plantation de pins,
4. plantation d'eucalyptus,
5. plantation d'agrumes,
6. pâturage,
7. pâturage,
8. culture traditionnelle.

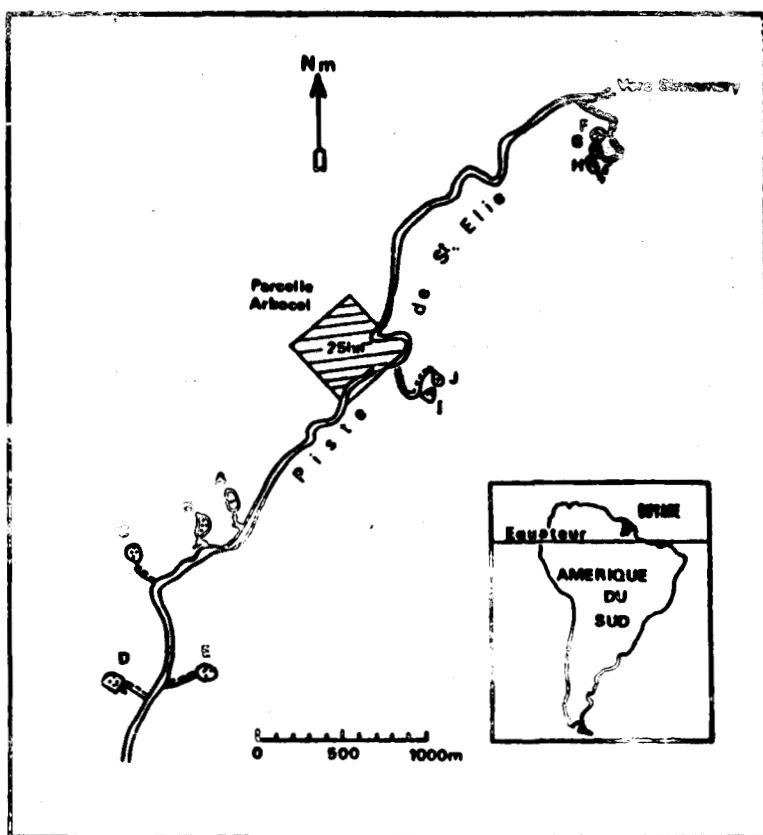


Fig. 6. — Ecérez. Situation des bassins versants expérimentaux

Le programme hydrologique sur les bassins versants expérimentaux ECÉREX s'attache à mesurer les effets que les transformations de l'écosystème primaire pourraient entraîner sur l'équilibre des phénomènes d'écoulement (cycle de l'eau, bilan hydrique) et d'érosion, contribuant ainsi à évaluer les conséquences des différentes possibilités de mise en valeur sur les facteurs naturels de production eau-sol.

Ces recherches comparatives nécessitent une caractérisation préalable des phénomènes dans l'écosystème original, c'est-à-dire sous forêt.

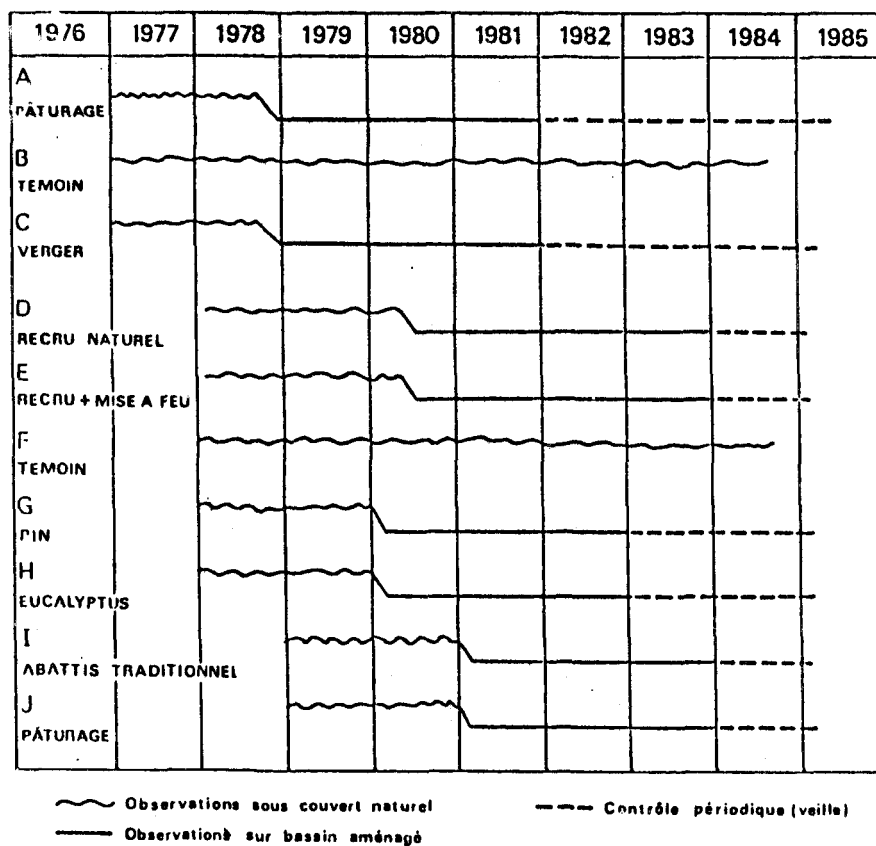


Fig. 2. — Ecérex
 Projet d'aménagement des bassins versants expérimentaux

2 -- DISPOSITIF ET METHODOLOGIE

Dans ces perspectives, un dispositif de dix bassins versants a été équipé (Fig. 1). Les observations sont réalisées sur huit bassins versants expérimentaux (BVE), sous forêt durant une première phase de deux ans, puis, dans un second temps, après déforestation et aménagement (Fig. 2). Deux bassins témoins supplémentaires (BVT) seront conservés sous forêt. Ils fourniront les références pour la reconstitution des événements sous forêt lors de l'expérimentation et permettront de suivre la variabilité pluviométrique interannuelle. Ils pourront éventuellement être l'objet d'expériences vers la fin de l'étude.

Les bassins, de 1,0 à 1,5 ha, présentent une homogénéité de surface. Leurs pentes, avec des valeurs maximales de 17 à 32%, sont représentatives d'environ 9/10 de la superficie des versants de la région. L'ensemble des caractéristiques morphologiques de chaque bassin est présenté dans le tableau 1 en annexe. Il est à souligner que les caractéristiques hydrodynamiques des sols ont présidé au choix des bassins, de façon à assurer la représentativité régionale de ces derniers.

Pour la mesure des précipitations, des lames d'eau écoulées et des quantités de sédiments exportées par charriage, l'équipement comporte sur chaque bassin un poste pluviographique, un déversoir-fosse à lame en V ou à lame H-Flume équipé d'un limnigraphe. Par ailleurs, des prélèvements d'eau sont effectués au cours des crues pour la mesure de teneurs de matières en suspension ou dissoutes tandis que les quantités de sédiments charriés sont mesurées mensuellement dans les fosses.

Parallèlement au dispositif de bassins versants expérimentaux exploités par l'ORSTOM, des mesures d'écoulement et d'érosion sont effectuées par le CTFT sur des parcelles expérimentales. Ainsi, les relations entre le ruissellement et l'érosion pourront être précisées sur les principaux systèmes pédologiques tandis que seront testés, en compléments des expériences menées sur bassins, les effets de techniques particulières d'aménagement.

L'équipement des bassins a été effectué progressivement de 1976 à 1978. Un premier groupe de 3 bassins (A, B, C) a commencé à être observé à compter de Janvier 1977. En Décembre 1978 a débuté la phase d'observation de 10 bassins, tandis que deux d'entre eux (A et C) ont été totalement déforestés pour être aménagés en verger et en pâturage. Les bassins B et F ont été retenus comme témoins.

Basée sur un traitement informatique des données, une méthodologie d'analyse comparative de l'évolution des phénomènes d'écoulement et d'érosion sur les bassins a été mise au point. Le comportement hydrologique et l'érosion de chaque bassin sont caractérisés par les valeurs spécifiques des événements individuels, à l'échelle de l'averse

et de la crue, par le bilan hydrologique mensuel et annuel et par les corrélations établies entre les diverses valeurs précédentes à différentes échelles de temps. Ce sont des corrélations entre les mêmes caractéristiques d'un bassin (pluie - ruissellement par exemple) ou entre les mêmes caractéristiques du bassin en cause et du témoin (cf. M.-A. ROCHE, 1978, 1979).

Ce rapport présente les connaissances acquises sur l'écosystème forestier primaire à ECEREX au cours des deux premières années d'observation. Il s'appuie également sur des éléments de pluviométrie, d'évapotranspiration, et d'écoulements dégagés des études réalisées sur d'autres bassins guyanais depuis 1951. Ces éléments constituent en effet de précieuses références qui permettent la caractérisation spatio-temporelle des résultats spécifiques de la zone étudiée.

3 - CARACTERISTIQUES DES PLUIES ET DES ECOULEMENTS

3.1. Les pluies

3.1.1. Les pluies annuelles

La pluviométrie annuelle a été de 3 475 mm en 1977 sur les bassins A, B, C. En 1978, elle a varié, selon les bassins A à H, de 3 110 mm à 3 430 mm (tableau 2, en annexe).

Si l'on compare la pluviométrie du poste B avec celle de Sinnamary, station distante d'une dizaine de kilomètres, on constate, sur la période 1977-1979, qu'il pleut 1,43 fois plus à ECEREX.

Le fort gradient pluviométrique qui existe dans la zone septentrionale de la Guyane (Fig. 3) peut d'ailleurs être mieux circonscrit, en fonction de la distance de ces stations à la mer, par l'examen des valeurs 1977 et 1978 obtenues à Sinnamary, ECEREX et Grégoire.

	Sinnamary	Ecérex				Grégoire 6
		F, G, H	I, J	A, B, C	D, E	
Distance à la mer (km)	6	14	16	17,5	19	43
Pluviométrie 1977 (mm)	2 380	-	-	3 475	-	(3 430)*
1978	2 205	3 440	-	3 330	3 390	(3 270)

* Les valeurs entre parenthèses sont estimées.

Entre Sinnamary et ECEREX B, le gradient serait d'environ 110 mm/km. Il est encore notable dans la zone d'ECEREX, avec, d'après les résultats disponibles, une valeur de 50 mm/km.

Il semblerait ainsi que l'axe NW-SE du dôme dessiné par les isohyètes passe plus près d'ECEREX A, D que de Grégoire. C'est la première

fois que des mesures réalisées sur un transect perpendiculaire à la côte permettent de préciser à grande échelle l'intensité de ce gradient pluviométrique.

La définition d'une station pluviométrique de référence, observée depuis quelques dizaines d'années dans le cadre du réseau climatologique régional, s'impose pour la caractérisation fréquentielle des pluies à ECEREX.

De prime abord, compte tenu de son rapprochement, Sinnamary semble le mieux convenir. Toutefois, l'écart pluviométrique important constaté entre cette station et ECEREX a conduit à rechercher une meilleure station de référence, dans la zone de fortes précipitations. Ainsi Rochambeau, malgré un éloignement de 95 km, paraît présenter un régime plus semblable à celui qui règne à ECEREX. En effet, il est à noter en ce qui concerne Grégoire que les corrélations entre les totaux annuels sont généralement meilleurs avec Rochambeau qu'avec Sinnamary. S'il est encore trop tôt pour établir de telles corrélations intégrant

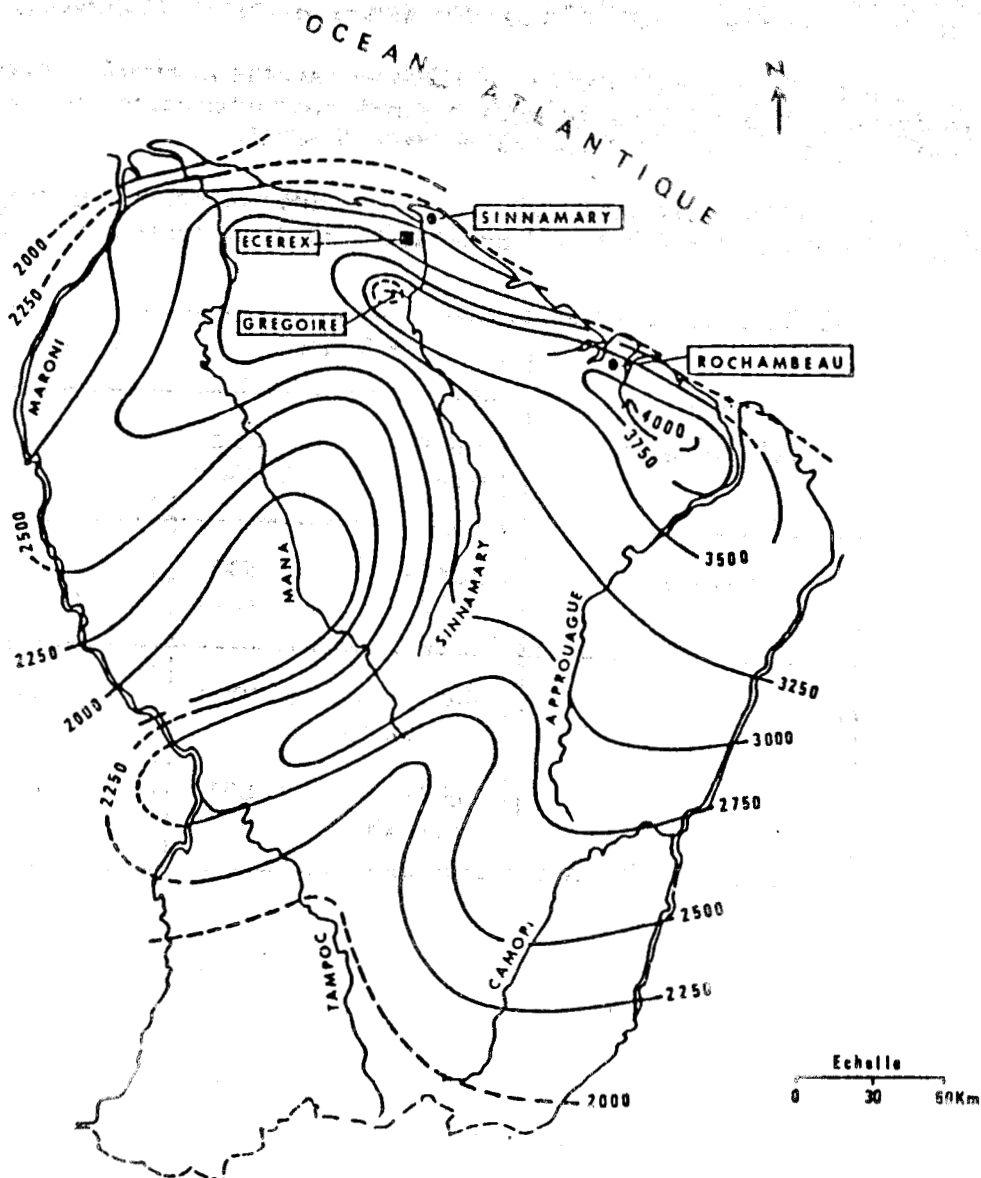


Fig. 3. — Pluviométrie moyenne annuelle (mm) en Guyane durant la période 1956-1976 (d'après Atlas de Guyane). Situation des bassins versants de Grégoire et Ecérex

les données annuelles d'ECEREX, par contre à l'échelle mensuelle, le coefficient de corrélation établi sur 31 mois est meilleur avec Rochambeau (0,92) qu'avec Sinnamary (0,87).

En attendant de disposer de plus longues séries d'observations à ECEREX, il paraît préférable de tenir compte pour référence des résultats de Rochambeau, et de Sinnamary.

La pluviométrie des années 1977 et 1978, d'après la distribution statistique établie par ajustement à la loi de Galton pour la période 1908-1978 (Fig. 4), apparaît médiane à Rochambeau et déficitaire à Sinnamary, avec une période de retour de 4 ans. Ainsi, à ECEREX la pluviométrie de ces deux premières années serait médiane ou légèrement déficitaire, avec une période de retour de 4 ans, selon la station prise pour référence.

Le rapport de la hauteur totale de pluie à ECEREX B et à Sinnamary est de 1,43 sur la période 1977-1979. Il est de 0,93 en prenant en considération la pluviométrie 1908-1978 de Rochambeau. En appliquant ces coefficients aux moyennes pluriannuelles de 1908-1978 de ces deux stations, la pluviométrie moyenne à ECEREX serait comprise entre 3 500 mm et 3 900 mm.

D'après ces valeurs, et celles des stations de référence, la pluviométrie 1977 serait égale à la moyenne ou déficitaire au maximum de 14%. Celle de 1978 serait déficitaire de 6 à 19%.

Le tableau ci-après indique les écarts relatifs de la pluviométrie 1977 et 1978 aux médianes et moyennes des trois stations étudiées.

Station	Référence	1977	1978
Rochambeau	méd. : 3 610	+ 3%	- 3%
	moy. : 3 732	0%	- 6%
Sinnamary	méd. : 2 630	- 10%	- 16%
	moy. : 2 721	- 13%	- 19%
ECEREX B	moy. 3 480 (f. Roch)	- 4%	- 1%
	moy. 2 890 (f. Sin.)	- 14%	- 9%

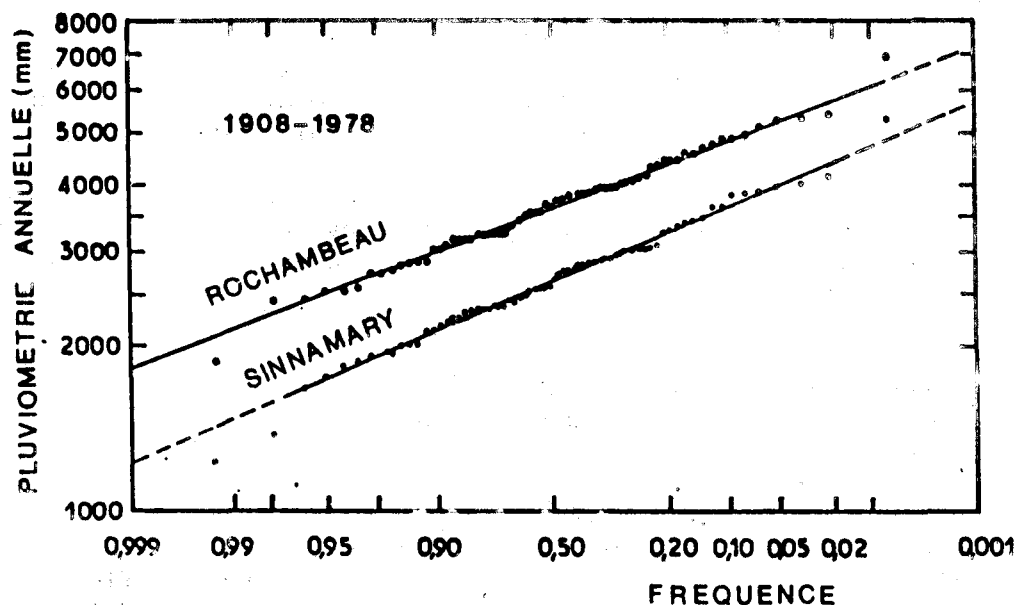


Fig. 4 — Fréquence des pluies annuelles à Rochambeau et à Sinnamary

3.1.2. Distribution saisonnière des pluies

Les mouvements de la zone intertropicale de convergence (ZIC) déterminent en Guyane, et à ECEREY en particulier, deux saisons :

- La saison des pluies débute vers la mi-novembre, lorsque la zone intertropicale de convergence aborde le pays par le Nord. Elle se termine vers la mi-août avec l'éloignement de la ZIC vers les Antilles. Des précipitations abondantes se produisent, particulièrement en Décembre-Janvier et de mi-avril à Juin, quand la ZIC oscille sur le pays. Par contre, le passage de sa bordure sud engendre en Juillet-Août des averses de caractères orageux. Les mois les plus pluvieux sont généralement Mai et Juin.

Toutefois, les périodes de beau temps, dues à une faible activité de la zone intertropicale de convergence ou à ses oscillations de part et d'autre de la Guyane, apparaissent au cours de cette saison. De telles accalmies sont plus fréquentes de Février à Mars-Avril parce que la ZIC tend à occuper sa position la plus méridionale, proche de l'équateur. C'est alors la petite saison des pluies de la grande saison des pluies.

La grande saison sèche, caractérisée par une faible pluviosité, s'étend de mi-août à mi-novembre. Les précipitations, localisées et souvent orageuses, sont observées fréquemment en fin d'après-midi. Il peut ne pas pleuvoir pendant plus d'un mois.

En se basant notamment sur les pluies mensuelles à Hochambeau et les observations effectuées à ECEREX, il est possible de caractériser la distribution saisonnière des précipitations sur les bassins, au cours de 1977 et 1978.

Pour ces deux années, la petite saison des pluies s'annonce forte avec un mois de Décembre 1976 et 1977 particulièrement pluvieux mais devient par la suite, dès les premiers jours de l'année, nettement déficitaire. La transition avec la petite saison sèche de Février-Mars se produit ainsi insensiblement.

A la fin de Mars, de fortes précipitations correspondent à un passage de la ZIC et au début de la grande saison des pluies que l'on peut considérer comme normale en 1977, mais déficitaire en 1978 jusqu'en Août.

La grande saison sèche ne montre pas d'anomalies majeures. Quant au mois de Décembre 1978, il apparaît relativement pluvieux pour la troisième fois consécutive.

3.1.3. Pluviométrie journalière

La fréquence annuelle des pluies journalières classées par tranche de hauteur, telle qu'elle a été observée à la station climatologique (n° 16) de Grégoire, de 1968 à 1976, constitue la meilleure référence disponible pour ECEREX :

Hauteur journalière	0,1-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140
Fréquence	154	77	41	13	6,3	1,2	0,9	0,3

Il semble qu'en 1977 soit survenu à ECEREX un nombre élevé de fortes pluies journalières puisque trois à six d'entre elles, selon les postes, dépassent 100 mm, alors qu'à la station climatologique de Grégoire de telles précipitations n'ont été observées que onze fois en neuf ans.

En 1978, on note selon les postes de zéro à trois pluies supérieures à 100 mm, nombre plus proche de la moyenne observée à Grégoire.

Il est à noter que ces fortes pluies journalières sont généralement engendrées par des passages accentués de la zone intertropicale de convergence. Elles ne constituent alors qu'une part d'épisodes pluvieux encore plus importants. Ainsi, l'un d'eux, avec une hauteur de 350 mm en 54 heures, présente une récurrence évaluée proche de la décennale.

Le nombre de jours de pluie, de 266 en 1977 et 259 en 1978, au poste B, est proche de la moyenne à Grégoire, qui s'élève à 268.

3.1.4. Averses individuelles

L'étude des écoulements en relation avec les précipitations a conduit d'autre part à individualiser les averses supérieures à 3 mm et séparées les unes des autres par des intensités inférieures à 1 mm/h pendant 1 h 30. Ainsi ont été dénombrées au poste B, 417 averses en 1977, et 355 en 1978. Cette deuxième année apparaît donc sur ce plan encore déficitaire. Entre les bassins C et H, le nombre d'averses en 1978 a varié entre 368 et 338.

Les courbes de fréquences des intensités d'averse en fonction de durées données, établies pour le poste 16 de Grégoire (1968-1976), apparaissent également la meilleure référence disponible pour ECEREX (Fig. 5).

Bien que des hauteurs de pluies journalières de faibles fréquences soient survenues sur les bassins expérimentaux, il s'avère que les intensités 1977 et 1978, avec des valeurs maximales comprises entre 84 et 107 mm/h en 10 mn et une valeur isolée de 147 mm/h en 10 mn, n'ont en revanche pas dépassé la valeur de fréquence annuelle. Elles n'ont pu favoriser ainsi la formation de crues particulièrement érosives.

Il est à noter que les fortes pluies journalières, liées aux passages de la ZIC, ne sont généralement pas caractérisées par des intensités élevées. Celles-ci seraient plutôt associées aux pluies orageuses de la mi-juin à début septembre. C'est donc avec ce type de précipitations que risquent de se produire les écoulements et les érosions les plus intenses.

3.2. Les époulements

3.2.1. L'individualisation des événements ruissellement-érosion en crues indépendantes a été réalisée selon deux groupes de 5 bassins A à E et F à J, ayant respectivement pour témoin B et F. Il s'agit d'un groupement géographique qui tend à restreindre au minimum les écarts des caractéristiques des précipitations entre les différents bassins du dispositif comparatif et permet de bénéficier ainsi d'une similitude optimale entre les crues.

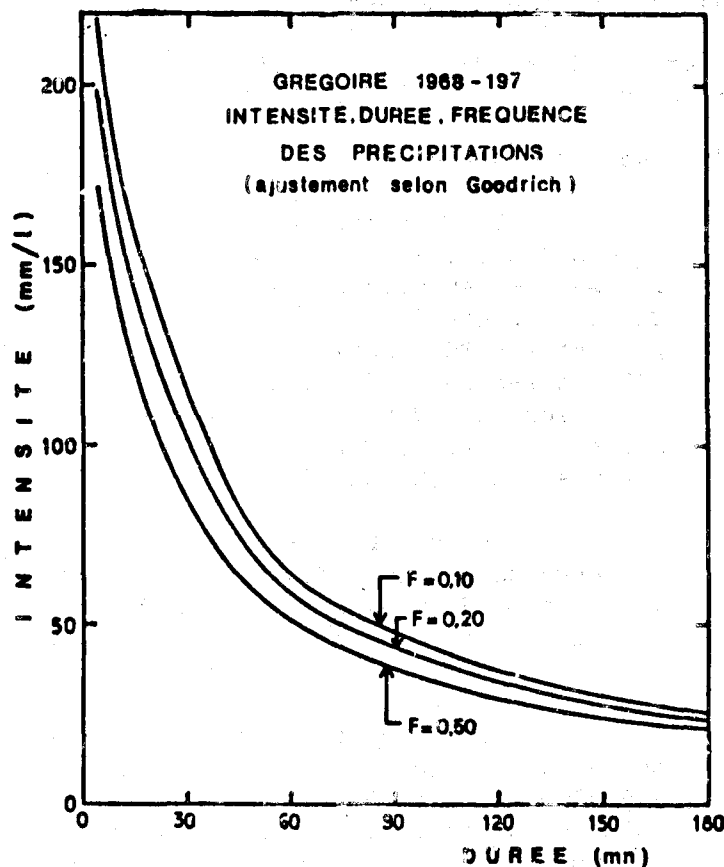


Fig. 5. — Fréquence des intensités des précipitations en fonction de leur durée à Grégoire, durant la période 1968-1976

Les bassins témoins ont été choisis parmi les premiers observés dans chaque groupe pour leurs ruissellements les plus fréquents. Par la suite, ce choix a pu être entériné par l'étude de corrélations établies entre les diverses caractéristiques des bassins.

La numérotation des crues individuelles est la même par groupe géographique de bassins, de façon à faciliter leur comparaison. Dès lors qu'un évènement se produit sur l'un des cinq bassins, un numéro lui est attribué également sur les autres bassins, qu'il y survienne ou non⁽¹⁾.

3.2.2. Le nombre de crues s'élève à 121 sur le groupe A-C en 1977. En 1978, 102 crues sont comptées sur le groupe A-E et 107 sur le groupe F-H.

3.2.3. Les volumes maximums ruisselés au cours de crues individuelles (en m³/ha) sont mentionnés ci-après :

A	B	C	D	E	F	G	H
554	490	214	458	306	515	548	645

(1) Si l'évènement ne se produit pas sur l'un d'entre eux, la valeur 9 998 est attribuée aux caractéristiques prises en considérations pour ce bassin afin que le traitement par mini-ordinateur puisse tenir compte de l'absence d'évènement. Pour la même raison, les lacunes d'observation sont notées 9 999. Si par ailleurs, il arrive exceptionnellement qu'une des caractéristiques d'une crue soit confondue avec celle de la crue suivante, la valeur ainsi cumulée est affecté à la seconde crue, tandis que le nombre 9 997 est noté comme caractéristique de la première. Enfin une valeur estimée est enregistrée négativement.

Les volumes ruisselés annuellement sont assurés en grande partie par les plus fortes crues, comme l'indiquent les proportions revenant aux 10, 20 et 30 plus fortes crues survenues en 1977-1978 sur les bassins A, B, C :

	A	B	C
10 crues	38%	35%	49%
20 crues	56%	55%	66%
30 crues	66%	66%	71%

3.2.4. Les débits spécifiques d'écoulement maximums observés au cours des crues, présentés (en l/s. ha) dans le tableau ci-après, sont compris entre 82 et 285 l/s. ha.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1 ^{er} crue	198	143	82	179	108	279	246	285
2 ^e crue	188	126	49	133	81	137	105	159

3.2.5. Les débits spécifiques de ruissellement maximums sont peu différents de ceux-ci, les débits de base étant compris généralement entre 0,1 et 5 l/s.

3.2.6. Les temps de montée sont normalement compris, pour des crues simples, entre 10 mn et une heure, tandis que les temps de base sont généralement de quelques heures, dépassant rarement une dizaine d'heures.

4 - LES PHASES DU CYCLE DE L'EAU ET LEURS CORRELATIONS : COMPORTEMENTS HYDROLOGIQUES COMPARES

4.1. Homogénéité des résultats

Les bilans ont été établis pour chaque bassin après qu'une homogénéisation des données ait été effectuée sur la base des corrélations entre diverses caractéristiques pluviométriques du bassin, ou entre les mêmes caractéristiques du bassin en cause et du témoin. Certaines de ces corrélations seront également étudiées pour ce qu'elles peuvent apporter en complément aux bilans dans la connaissance des comportements hydrologiques des bassins.

Les valeurs des principaux termes du bilan 1977 et 1978, mesurées sur les différents bassins sous forêt, sont présentées dans les tableaux II, en annexe.

Pour les bassins A et C, les valeurs d'écoulement du mois de Décembre 1978, durant lequel des crues sont intervenues alors que la déforestation venait d'être réalisée, ont été maintenues. Les corrélations ont en effet montré que ces valeurs étaient analogues à celles qui auraient pu être observées si l'état naturel n'avait été détruit. Cela est vrai pour les premiers écoulements qui se produisent après la disparition totale de la végétation, y compris de ses souches, mais, comme il ressort des observations réalisées en 1979, ne l'est plus par la suite, les valeurs devenant nettement plus élevées. Ce faible accroissement de l'écoulement au début de l'exploitation s'explique par le bouleversement du sol, la création par les engins de billons, plus ou moins parallèles aux courbes de niveau, et de fosses dans le thalweg, qui augmentent, tant qu'ils ne sont pas comblés par des atterrissements de sols, la capacité de rétention du bassin. Cet effet contrebalance ainsi au début la suppression de l'interception de la pluie par la végétation et de la rétention assurée par la litière et le réseau superficiel de racines.

4.2. Définition et mode d'estimation des principales phases du cycle de l'eau sous forêt

Les phases majeures du cycle de l'eau sur un bassin forestier du type ECEREX, telles qu'elles sont schématisées sur les figures 6 et 7, peuvent être formulées par une équation simple du bilan :

$$Pb = He + DE$$

Pb étant la pluie brute sur la forêt mesurée en clairière,
He l'écoulement superficiel mesuré à l'exutoire,
DE le déficit d'écoulement constaté, lequel est évalué par différence des deux termes précédents.

Par ailleurs, l'examen de l'hydrogramme permet de distinguer :

$$H_e = H_r + H_b$$

l'écoulement superficiel étant décomposé en ruissellement H_r et en écoulement retardé et de base H_b . Cet écoulement, appelé simplement de base par la suite, correspond au ressuyage des sols depuis leur surface jusqu'au tarrissement des horizons pédologiques plus ou moins profonds drainés par le thalweg.

Le déficit d'écoulement est provoqué par l'évapotranspiration ETR et par la vidange H_s de la nappe qui, tel à ECEREX, se réalise en partie en aval des stations hydrométriques limitant les bassins et échappe donc à l'écoulement de base mesuré. D'autre part, l'équilibre du bilan impliquant un état des réserves souterraines analogue en début et en fin de période, convient-il d'introduire le terme $+ R$ qui correspond à la variation excédentaire ou déficitaire des réserves des zones saturée et aérée. On peut également associer à ce terme la variation du stock hydrique de la biomasse végétale.

Il vient :

$$DE = ETR + H_s + R$$

Le bilan peut s'écrire ainsi :

$$P_b = H_r + H_b + H_s + R + ETR$$

L'évapotranspiration sera étudiée en premier, dans le paragraphe suivant, en raison de son mode d'évaluation, mais surtout parce qu'elle est provoquée par plusieurs phénomènes très distincts les uns des autres qui interviennent de manière indépendante au niveau des différentes phases du cycle de l'eau. Les variations dans l'espace et le temps des divers écoulements seront ensuite examinées avant une étude comparative plus fine du ruissellement et des écoulements souterrains, en liaison avec les facteurs sols et pentes.

4.3. Evapotranspiration, interception

A l'interception IN de la pluie brute P_b par la voûte forestière succèdent une évaporation et une absorption foliaire suivie d'une transpiration hydrique (Fig. 6). La quantité d'eau météorique non interceptée atteint le sol, soit directement ou après égouttement à travers le feuillage, P_v , soit par écoulement le long des troncs, P_t . Une partie de cette eau subit une évaporation, E_s , à partir de la litière (E_l) et de la terre (E_t).

Par ailleurs, les végétaux prélèvent par leurs racines dans les sols, saturés ou non, la quantité d'eau TR nécessaire pour compléter leur transpiration hydrique.

L'évapotranspiration réelle ETR, ainsi engendrée par plusieurs processus physiques et biologiques, peut s'écrire :

$$ETR = IN + TR + Es$$

L'évapotranspiration réelle ETR a été mesurée par la méthode du bilan hydrologique sur les grands bassins versants de Guyane et sur les bassins versants représentatifs de Grégoire où, à l'échelle pluri-annuelle (25 et 9 ans), et compte tenu des conditions hydrologiques différentes de celles d'ECEREX, les termes évacuation souterraine H_s et variation du stock hydrique + R apparaissent négligeables, permettant ainsi d'assimiler le déficit d'écoulement à l'évapotranspiration réelle (M.-A. ROCHE, 1979). Il ressort que la valeur moyenne annuelle de l'ETR à Grégoire, soit 1 470 mm, peut être attribuée aux bassins ECEREX, compte tenu de la proximité des deux sites et de leur pluviométrie quasi analogue.

En ce qui concerne l'interception IN et les parts respectives de l'évapotranspiration, les mesures effectuées à Grégoire (M.-A. ROCHE, 1979) peuvent également servir de références à ECEREX pour présenter un bilan plus détaillé, notamment pour les phases souterraines du cycle de l'eau.

L'interception IN représente 15% de la pluviométrie annuelle tandis que l'évaporation Es peut être estimée proche de 70 mm. Arbitrairement, on admet qu'elle se répartit en une évaporation de 50 mm à partir de la litière et de 20 mm à partir du sol. Le complément de l'ETR est assuré par la transpiration TR des végétaux. La pluie P_v atteignant la litière, à travers la voûte ou directement, représente 85%, tandis que l'écoulement le long des troncs d'arbre est inférieur à 1%.

4.4. Variations spatio-temporelles des termes du bilan

Selon les bassins, en 1978, la pluviométrie annuelle varie entre 3 430 et 3 110 mm, soit 3 270 mm + 5% (Fig. 6 et 7). L'évapotranspiration représente 43 à 47% des pertes, et l'écoulement global de 10 à 44% (tableau 2). Ce dernier se partage entre le ruissellement compris entre 4 et 26%, et un écoulement de base, compris entre 1 et 18%. La part évacuée hors des bassins par les nappes est évaluée entre 9 et 46%. Le déficit d'écoulement varie de 56% à 90%.

Les années 1977 et 1978 ont débuté et se sont terminées dans des conditions pluviométriques et hydrologiques presque analogues qui impliquent une variation très faible du stock d'eau. Les valeurs relatives aux nappes peuvent donc, pour ces deux années, être dégagées du terme + R sans qu'une erreur importante soit introduite.

Les intervalles de variation de chaque terme du bilan apparaissent donc très larges sur l'ensemble du dispositif de bassins.

Par contre, des résultats obtenus pour chacun des premiers bassins observés au cours des années 1977 et 1978 ressort une faible dispersion interannuelle, sans rapport avec la dispersion spatiale. Ainsi, pour le bassin B par exemple, les écarts à la moyenne des deux années sont les suivants :

$$\begin{aligned} \text{Pb} &= 3\,450 \text{ mm} \pm 1,7\%, & \text{Hr} &= 16,3\% \pm 1,2\%, & \text{Hb} &= 6,6\% \pm 1,3\% \\ \text{Hs} (+ \text{R}) &= 35,1\% \pm 1,9\% \end{aligned}$$

Les observations n'ayant porté que sur trois bassins en 1977, les comparaisons entre les bassins A à I peuvent être basées de façon significative uniquement sur les données de l'année 1978 qui ont l'avantage de constituer un ensemble homogène.

La dispersion spatiale traduit donc des conditions de drainage très différentes selon les sites.

Il existe cependant des analogies entre certains bassins. Aussi, pour faciliter les comparaisons, a-t-il été distingué quatre groupes composés d'un, de deux ou trois bassins pour lesquels les écarts entre les différents termes du bilan sont voisins. Il s'agit par ordre de ruissellement croissant, ou de drainage souterrain décroissant, des groupes (1) C, (2) D, E (3) A, B et (4) F, G, H.

La figure 6 illustre pour chacun de ces groupes la distribution détaillée des termes du bilan.

Il convient ainsi de rechercher l'influence respective des facteurs sols et pentes qui déterminent des comportements hydrologiques aussi bien distincts. C'est l'étude du ruissellement, le terme du bilan le plus variable sur le dispositif, qui va permettre un tel examen.

4.5. Ruissellement, systèmes pédologiques de drainage et pentes

4.5.1. Valeurs comparées

Les rapports des coefficients de ruissellement (Hr %), indiqués ci-dessous, varient dans une gamme de 1 à 6, le bassin C qui ruisselle le moins étant pris pour référence :

	A	B	C	D	E	F	G	H
Ruissellement Hr	3,7	3,6	1	3,1	2,3	6,1	5,1	5,5

Les ruissellements spécifiques annuels sont compris entre 45 et 255 l/s. km².

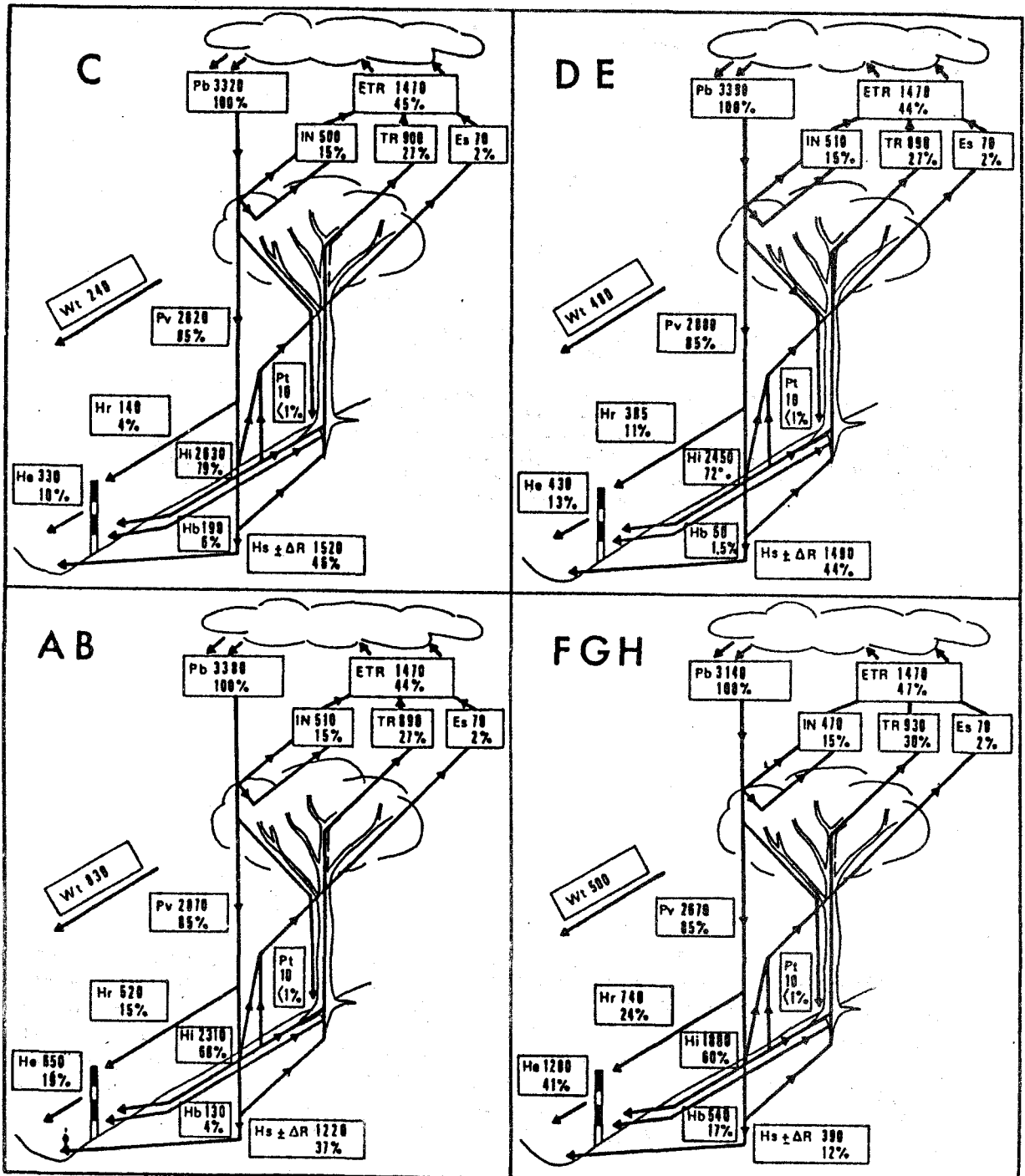


Fig. 6. — Ecérex 1978. Bilan hydrologique des groupes de bassins versants expérimentaux. PB : pluie brute sur la forêt, IN : interception par la voûte forestière, TR : transpiration à partir de l'eau des sols, Es : évaporation des sols, ETR : évapotranspiration, Pv : pluie à travers la voûte, Pt : écoulement le long des troncs, Hr : ruissellement, Hi : écoulement en contact prolongé avec le sol, Hb : écoulement de base, He : écoulement, Hs : pertes souterraines, R : variations des réserves hydriques

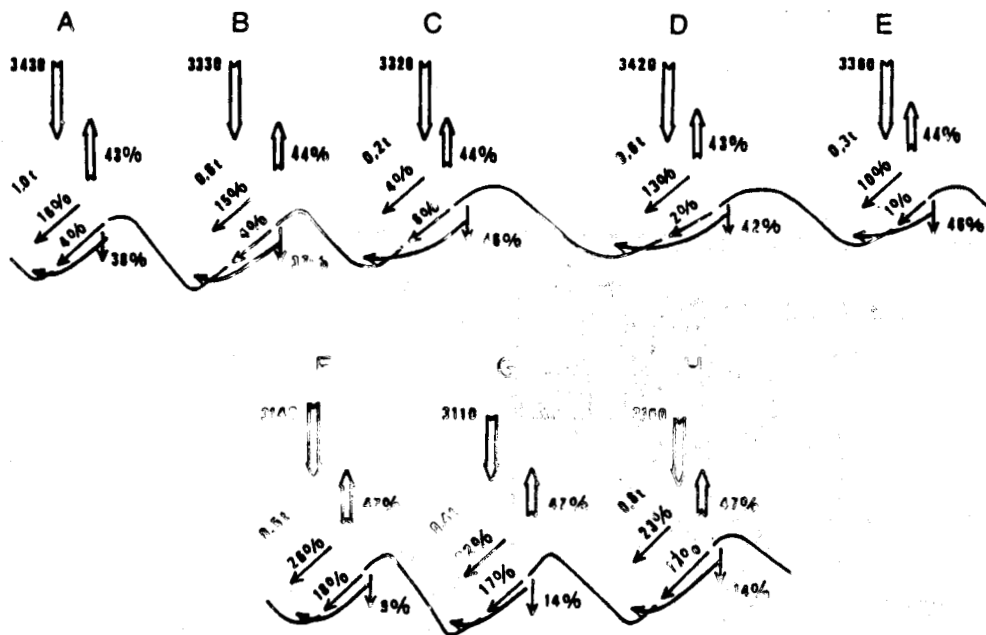


Fig. 7. — Ecérex 1978. Schématisation de la répartition des principales phases du cycle de l'eau dans les bassins versants Ecérex sous forêt tropicale humide.

A titre d'exemple, sur le bassin B, il est tombé 3 380 mm de pluie (Pb) dont 44% ont été évapotranspirés (ETR), 15% ont ruisselé (Hr), 4% ont constitué l'écoulement de base (Hb), quelques heures à quelques jours après la pluie, 37% ont été évacués par les nappes souterraines (Hs). L'érosion mécanique (W) exporte 0,6 t/ha · an de sédiments

La corrélation entre la lame ruisselée à chaque crue et la hauteur de l'averse correspondante (Fig. 8, d'après Fig. 1 A présentée en annexe), établie pour chaque bassin, confirme les résultats du tableau ci-dessus. On remarque que le bassin H ruisselle mieux que le F au cours des averses les plus fortes. Les ruissellements des bassins I et J peuvent être classés par rapport à celui des autres bassins, d'après les observations effectuées fin 1978. Le ruissellement du I se situe en position intermédiaire à ceux des D et E. Celui du J semblerait l'affilier au groupe F - G - H.

Les courbes de corrélation peuvent être chacune assimilées à deux segments de droite différenciés par une rupture de pente correspondant à des hauteurs d'averses comprises entre 20 et 50 mm, mais d'autant plus élevées que le bassin est perméable. Ce point critique marque un seuil de saturation de l'horizon supérieur, au-delà duquel le ruissellement est maximum.

A l'échelle mensuelle, la même corrélation (Fig. 9, d'après Fig. 3 A en annexe) conduit à une interprétation analogue. Il se confirme en outre que durant les mois de pluviométrie moyenne, le ruissellement sur le bassin D et, dans une moindre mesure sur le E, peut être plus intense que sur A et B. Il est vrai que les petites crues sont alors nombreuses sur ces premiers bassins.

Il est aussi intéressant de mentionner la corrélation entre les lames ruisselées mensuellement sur les divers bassins et celle du bassin témoin B (Fig. 10, 4 A et 5 A) qui fait apparaître un classement des valeurs conforme à celui du tableau précédent.

4.5.2. Influence des sols

L'étude des sols de la forêt a été réalisée par A. LEVEQUE (1963) et F. LELONG (1969), puis par R. BOULET, E. FRITSCH, et F.-X. HUMBEL (1978, 1979). Ces récents travaux, effectués notamment à ECEREX, s'attachent à étudier particulièrement l'organisation structurale des sols des bassins d'après des caractéristiques hydrodynamiques diverses. Ils éclairent ainsi d'un jour nouveau la genèse et surtout le comportement des sols vis-à-vis de l'air et de l'eau, constituant une contrepartie efficace des mesures hydrologiques pour la compréhension des phénomènes qui déterminent les phases d'écoulement du cycle de l'eau.

Inclus sous la dénomination de "schistes de Honidoro", les terrains antécambriens sur lesquels s'étendent les bassins ECEREX sont principalement des micaschistes dans lesquels apparaissent ci et là de larges filons de pegmatites. Une altération intense y a créé une couverture ferrallitique de plusieurs mètres d'épaisseur, constitués en grande partie de kaolinite et de sable.

Sur ces matériaux d'altération issus des micaschistes fins, où dominent les limons, et ceux issus de pegmatites, où sables grossiers et graviers quartzeux abondent, se sont développés indifféremment à ECEREX deux grands ensembles de sols, caractérisés par leur comportement hydrologique (E. FRITSCH, 1979). La circulation des eaux s'y effectue en surface et à l'intérieur selon un mode complexe :

- l'un des ensembles est à drainage vertical libre sur plusieurs mètres ;

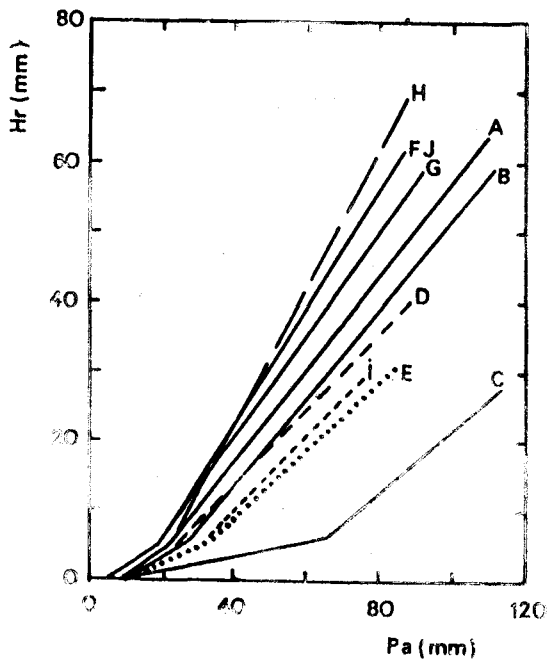


Fig. 8. — Ecérex 1977-1978. Corrélation entre la lame ruisselée à chaque crue et le hauteur de l'averse correspondante. Les courbes définies pour les différents bassins sur la figure 1 A ont été regroupées pour comparaison sur ce même graphique

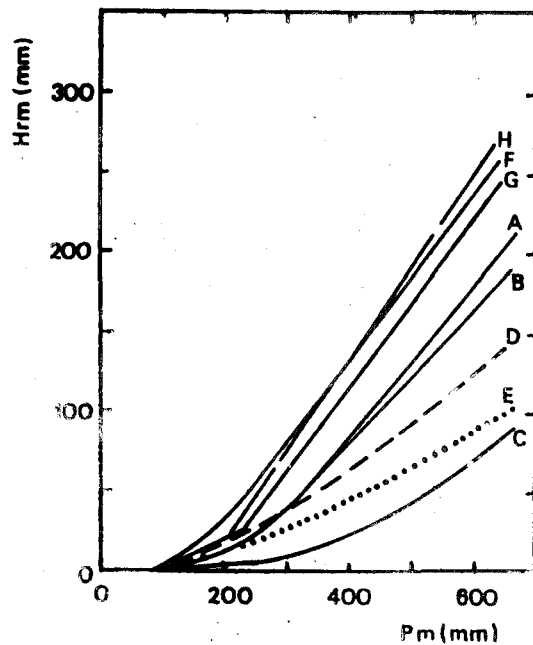


Fig. 9. — Ecérex 1977-1978. Corrélation entre la lame ruisselée mensuelle et la pluviométrie mensuelle sur les différents bassins

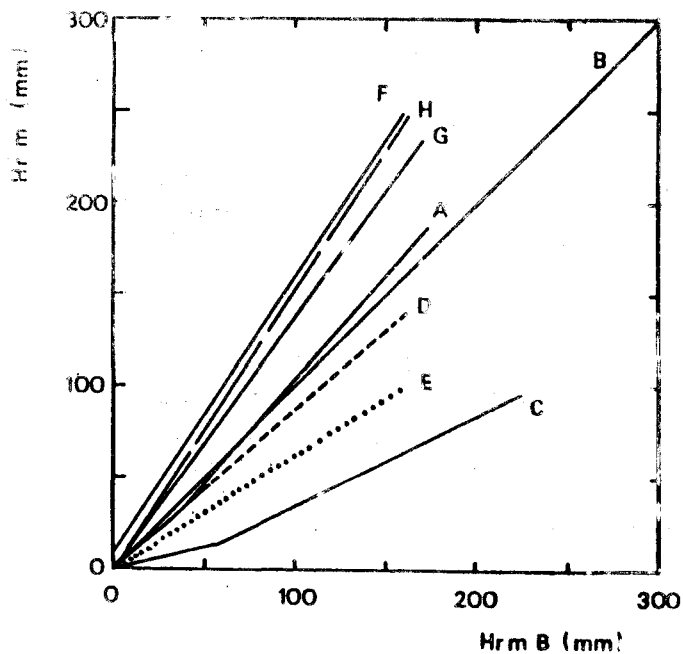


Fig. 10. — Corrélation entre les lames ruisselées mensuelles des divers bassins Ecérex et celle du bassin témoin B (d'après fig. 5 A)

- l'autre à drainage vertical ralenti ou bloqué à quelques décimètres, l'écoulement paraissant s'effectuer essentiellement dans l'horizon supérieur.

Le premier type couvre le bassin C, tandis que le deuxième s'observe sur les bassins A, B, F, G, H (10% du premier type sur B). Les deux types peuvent être observés sur un même bassin : le premier occupe les parties les plus hautes puis se trouve progressivement relayé vers le bas par le deuxième type. C'est le cas des bassins mixtes D, E, I.

a) Le type à drainage vertical libre comporte en surface un horizon dont l'épaisseur peut atteindre 1 m. Il est constitué de micro-agrégats de 0,2 mm de diamètre qui lui donnent un aspect friable. Sa bonne perméabilité en petit est améliorée par la présence de plans verticaux de nodules ferrugineux centimétriques et de blocs de grès grossiers.

Il repose sur un horizon compact argileux caractérisé par une épaisseur d'un à plusieurs mètres, une porosité nettement plus fine, une structure polyédrique en assemblage très serré et par la présence de pores dont le diamètre est de l'ordre du dixième de millimètre.

La perméabilité de cet horizon sous-jacent paraît suffisante pour une infiltration plus profonde des eaux ⁽¹⁾. L'ensemble repose sur un matériau d'altération très épais.

b) Le type à drainage latéral comporte en surface un horizon de quelques décimètres d'épaisseur seulement. Il se distingue de l'horizon superficiel du type à drainage libre par une porosité plus fine mais aussi par un développement des boyaux dont le diamètre peut atteindre plusieurs centimètres.

L'horizon inférieur qui ralentit ou bloque l'infiltration, est soit un horizon argileux compact (cas des bassins A, B), de porosité si fine qu'il semble sec au toucher, malgré une teneur élevée en eau, soit un horizon d'altération argilo-limoneux (cas partiel du bassin F) moins compact et de porosité moins fine que le précédent, mais cependant très peu perméable.

Pendant et peu après les averses, vers 5 à 15 cm de profondeur, une nappe perchée s'établit dans l'horizon supérieur. Elle s'accumule peu à peu dans les boyaux anastomosés dans lesquels elle peut s'écouler latéralement par trop-pleins successifs, dès lors que la porosité fine doit être saturée (HUMBEL, 1978).

Ainsi, les comportements hydrologiques apparaissent conformes aux différents systèmes pédologiques de drainage.

(1) Cet horizon manifeste en effet, malgré sa faible porosité visible, un comportement perméable lorsqu'il est surmonté d'un horizon à micro-agrégats d'une puissance suffisante, supérieure à 70 cm (BOULET, R. et al., 1979).

Considéré selon les groupes de bassins, le ruissellement croît avec l'accentuation du freinage du drainage vertical. Il a été vu que pour le bassin C, qui représente le type du drainage vertical libre, il n'est que de 4%, contre 24%, soit 6 fois plus, pour le type extrême du drainage vertical ralenti des bassins F, G, H. De même, les bassins A, B, à drainage vertical moins sévèrement ralenti, ruissellent 4 fois plus et ceux dits de type mixte, D, E, 3 fois plus.

4.5.3. Influence des pentes

Si les potentialités de ruissellement concordent bien avec les caractéristiques hydrodynamiques des sols, en revanche les caractéristiques morphologiques (tableau 1, en annexe), notamment les pentes topographiques, n'apparaissent pas un facteur primordial des écarts constatés entre les bassins. Les indices de pente varient de 0,34 à 0,47 selon les bassins, soit dans le rapport 1,4, mais, par exemple, sont analogues pour les C et G entre lesquels le ruissellement augmente dans le rapport 5.

Les pentes maximales des versants varient sur l'ensemble des bassins dans le rapport 2. Il est vrai que les ruissellements les plus intenses ont lieu sur les bassins F et G où les pentes maximales, de 32%, sont les plus fortes du dispositif. Cependant, elles ne sont que de 20% sur le H qui ruisselle tout autant, et de 21% sur le C qui ruisselle 5 à 6 fois moins.

De même, la pente moyenne des thalwegs varie selon les bassins dans le rapport 3, mais le ruissellement ne paraît pas du tout en dépendre : Elle est de 6% sur le F, 19% sur le G à ruissellement élevé, et de 21% sur le C sur lequel le ruissellement est le plus faible.

Il ressort donc que les sols sont l'élément déterminant des ruissellements sur le dispositif, alors que l'influence des pentes topographiques apparaît moins nettement. Par ailleurs, la comparaison des corrélations notamment mais aussi des bilans, montre que les ruissellements sur les bassins s'étalent régulièrement sur toute une gamme de valeurs. Il serait donc vain de s'attacher à une définition de classes de comportements hydrologiques trop cloisonnées et donc de sols, au-delà des nécessités de la clarté des exposés.

(2) Semblable à celui qui est situé sous l'horizon à microagrégats du premier ensemble.

4.6. Capacité de rétention des bassins

Grâce notamment aux évaluations des diverses phases de l'ETR, la capacité de rétention globale des sols H_i peut être évaluée. Elle correspond à l'eau qui, après avoir atteint la litière, échappe au ruissellement et à l'évaporation E_l , c'est-à-dire la quantité d'eau qui a un rapport plus ou moins profond et prolongé avec le sol.

Une faible partie de H_i donnant lieu au ressuyage quasi superficiel, il est cependant délicat de l'assimiler d'emblée à l'infiltration depuis la surface.

Elle est évaluée tel que

$$H_i = (P_v + P_t) - (H_r + E_l)$$

La part H_i donne naissance à l'écoulement de base H_b , assure la transpiration hydrique T_R à partir des racines et l'évaporation directe E_t à partir de la terre ainsi que l'augmentation du stock d'eau souterrain R et les résurgences des nappes à l'extérieur du bassin. Il peut ainsi s'écrire également

$$H_i = (H_b + H_s + R) + (T_R + E_t)$$

La capacité de rétention globale des bassins, H_i , varie en sens contraire du ruissellement mais dans un intervalle plus restreint, passant de 79% sur le bassin C à 60% sur les F, G, H.

Comme cela a été fait pour le ruissellement, l'importance relative de la capacité de rétention de chaque bassin ressort des rapports des valeurs (H_i exprimées en % pour annuler les écarts dus à la pluviométrie), le bassin F, le moins perméable, étant pris pour référence.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Capacité de rétention H_i	1,2	1,1	1,4	1,2	1,3	1	1,1	1,0

La gamme de variation de 1 à 1,4, paraît donc faible. Les bassins à drainage vertical le plus ralenti, à pentes maximales, possèdent malgré tout une capacité de rétention égale au 3/4 de celle du bassin C où le drainage vertical est le plus libre.

4.7. Écoulement de base

4.7.1. Valeurs comparées

La restitution au thalweg, en amont de la station, c'est-à-dire l'écoulement de base H_b est très variable. Il est de 6% pour C, 1,5% pour D, E, 4% pour A, B et 17% pour A, B et 17% pour F, G, H, soit dans ce dernier cas 3 fois plus que pour le C. On constate que cet écoulement de base est plus élevé sur F, G, H que sur les autres bassins, alors qu'il s'agit des plus imperméables.

D'autre part, cet écoulement de base est plus faible sur D, E que sur C et A, B alors que les sols sont d'un type intermédiaire à ces deux derniers groupes. Ce terme écoulement de base H_b correspond à un ensemble de plusieurs phénomènes, depuis le ressuyage superficiel du bassin jusqu'à la vidange d'une épaisseur variable d'horizons pédologiques divers.

Intervient donc ici la notion du complexe aquifère.

4.7.2. Le complexe aquifère

Les horizons pédologiques, répartis sur la masse d'altération, grosso modo à la manière de couches sédimentaires concentriques à la topographie, montrent une différenciation le long des pentes. Ils peuvent se terminer en biseau, laissant vers l'aval le relais à un horizon de caractéristiques différentes, ou perdre leur identité si une nappe les baigne en permanence. Il est à noter la présence en surface d'un horizon hydromorphe dont le développement vers l'amont croît avec l'intensité du blocage du drainage vertical.

Selon leur porosité, leur perméabilité et leur épaisseur, ces horizons superposés accumulent les eaux et les laissent s'infiltrer plus ou moins abondamment en profondeur. On conçoit ainsi que leur dépendance vis-à-vis de l'alimentation par les pluies est d'autant plus marquée qu'ils sont proches de la surface, les horizons inférieurs, généralement plus épais, étant alimentés en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des horizons supérieurs. Les horizons inférieurs sont donc capables, quelle que soit leur porosité ou leur perméabilité, de se tarir plus lentement puisqu'ils reçoivent des horizons supérieurs des apports plus réguliers dans le temps. D'après F.-X. HUMBEL (1978), dans le système de sol à drainage latéral, les horizons compacts qui bloquent ou freinent l'infiltration, échapperaient totalement à la dynamique saisonnière de l'eau ou n'y participeraient que lentement et faiblement, alors qu'au-dessus, le système de l'horizon superficiel "micro-kartique", se remplit depuis la base au cours des épisodes pluvieux pour assurer ensuite latéralement, à faible profondeur, l'évacuation rapide du trop-plein.

Ainsi, le tarissement, tel qu'il est mesuré dans le thalweg, est constitué de plusieurs phases, de plus en plus longues, correspondant aux arrêts successifs de la participation des différents horizons.

A Grégoire, ce phénomène est net car les stations sont établies sur seuil inaltéré de telle sorte que le tarissement à son début, provient de tous les horizons aquifères du bassin. L'hydrogramme de crue, tracé en coordonnées semi-logarithmiques, montre un tarissement rapide qui marque la contribution importante d'un ou plusieurs horizons peu profonds dont les saturations variables avec l'alternance des épisodes pluvieux et secs déterminent un nombre variable de composantes secondaires de l'ordre de quelques jours. Il est relayé par un tarissement plus lent, essentiellement assuré par la vidange d'un aquifère plus profond et moins perméable qui pourrait correspondre à l'horizon d'accumulation et à la masse d'altération.

Il est à noter que dans ce cas, assez général pour ce type de terrain, la délimitation de la fin du ruissellement d'après l'hydrogramme ne peut s'appuyer que sur un ensemble de critères le plus homogène possible, mais qu'une part de détermination subjective demeure forcément.

4.7.3. L'enfoncement du thalweg et du bassin dans la couverture pédologique

Il apparaît alors une autre notion importante pour appréhender la signification des comparaisons entre bassins à ECEREX, du terme écoulement de base Hb, ainsi que des termes évacuation souterraine Hs et variation du stock d'humidité + R. C'est celle de l'enfoncement du thalweg d'une part, et du bassin d'autre part, dans la couverture pédologique, consécutif aux jeux conjugués de la pédogénèse et de l'érosion. Par conséquent, la position de la station hydrométrique, plus ou moins en aval, est aussi un facteur déterminant des quantités d'eau souterraines récupérées pour l'écoulement de base.

En effet, tout en tête du bassin, seuls les horizons superficiels sont drainés par le thalweg peu marqué. Le tarissement est bref et peu important, l'essentiel des eaux infiltrées continue une circulation souterraine. Par contre, en aval, l'encaissement du thalweg permet de drainer un ensemble d'horizons plus épais, le tarissement dure longtemps, l'écoulement de base devient important et la part qui s'échappe sous la station diminue en conséquence. A la limite, si le thalweg atteint le mur imperméable de l'ensemble aquifère, un seuil inaltéré comme à Grégoire par exemple, la totalité du drainage souterrain Hs devient nul, au profit de l'écoulement de base Hb qui comprend alors la totalité des circulations souterraines.

La meilleure signification de l'écoulement de base paraît finalement rattachée à l'enfoncement du thalweg dans la couverture pédologique ainsi

qu'au profil pédologique ou sédimentaire de la zone du thalweg dans laquelle s'écoule l'inféro-flux. Ainsi les thalwegs F, G, H sont établis dans leur partie aval sur l'horizon d'altération et drainent la plus grande part des eaux infiltrées qui ont échappé à la transpiration des végétaux. Par contre, la faible part de l'écoulement de base en D, E de 1,5% doit correspondre essentiellement aux résurgences des eaux infiltrées dans les sols. Dans l'hypothèse où cette valeur de 1,5% revient en totalité au ressuyage superficiel, celui-ci n'en demeure pas moins très faible.

Il est à noter que l'inféro-flux est partiellement visible aux stations, plus ou moins abondant d'ailleurs, dans la tranchée qui, 2 m en contrebas des déversoirs, permet de vider les fosses à sédiments.

On retiendra donc l'interdépendance étroite entre l'écoulement de base Hb et l'évacuation souterraine Hs. Celle-ci est d'autant plus faible qu'une part importante des eaux de la nappe a déjà surgi avant la station pour y constituer l'écoulement de base.

4.8. Variation du stock hydrique et évacuation souterraine

La variation du stock hydrique $+ R$ tend à devenir négligeable devant les autres termes lorsque la période pluriannuelle croît. Ce n'est pas encore le cas pour les bassins ECEREX, mais les périodes prises en considération ont débuté et pris fin dans des conditions hydropluviométriques presque analogues qui impliquent une valeur de R faible. Le complément de l'ETR pour assurer le déficit d'écoulement revient alors en quasi-totalité à la décharge souterraine Hs.

D'autre part, le terme R varie par similitude sur tous les bassins en fonction des conditions climatiques, son influence est donc atténuée au niveau des comparaisons entre les bassins, bien que les caractéristiques hydrodynamiques du sous-sol soient également des facteurs déterminants.

Quoiqu'il en soit, à l'échelle annuelle, il semble préférable de considérer globalement le terme Hs ($+ R$), même si l'essentiel revient à la décharge Hs, qui traduit la potentialité d'infiltration "profonde" du bassin et l'importance de l'écoulement des nappes dans les horizons inférieurs. Evidemment, ce terme est en partie conditionné par la position de la station par rapport au complexe aquifère.

Le groupe F, G, H se distingue nettement, avec des valeurs de Hs comprises entre 9% et 14%, des autres bassins pour lesquels les valeurs sont comprises entre 37% et 46% (tableau 2 b). Dans ces premiers, l'essentiel du drainage des nappes est capté aux stations où il donne lieu à un écoulement permanent, sauf en fin de saison sèche moyenne, alors que les autres thalwegs A à I s'assèchent peu après les crues.

L'importance relative de cette évacuation souterraine ressort du rapport des termes (exprimé en %), le bassin F, le moins perméable, étant pris pour référence.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Evacuation souterraine Hs	4,1	4,0	4,9	4,5	4,9	1	1,5	2,2

Elle est 4 à 5 fois plus forte sur les bassins A à E que sur bassin F.

Plus que l'organisation pédologique du bassin, l'enfoncement du thalweg par rapport à la couverture pédologique, au niveau de la station, apparaît finalement le facteur déterminant de l'évacuation souterraine. Pour un bassin, il dépend donc de la position plus ou moins aval de la station hydrométrique.

4.9. Ecoulement global des nappes souterraines

Une fois prélevé sur H_i la transpiration des végétaux TR et l'évaporation du sol Et , il s'écoule une part H_n qui regroupe les quantités d'eaux souterraines restituées pour constituer l'écoulement de base H_b et celles, $H_s (+ R)$, qui sont évacuées souterrainement, soit :

$$H_n = H_b + H_s (+ R)$$

C'est une valeur par excès du débit souterrain effectif, puisqu'une faible part revient au ressuyage superficiel de l'écoulement retardé.

L'étude de ce terme H_n évite l'inconvénient, évoqué précédemment, de l'interdépendance des termes H_b et H_s qui le composent.

Il peut être aussi évalué tel que :

$$H_n = H_i - (TR + Et)$$

Ce terme H_n traduit assez bien la transmissivité globale des nappes des bassins mais contient encore la part du ressuyage quasi superficiel incluse dans H_b .

Les valeurs varient de 52% sur le bassin C, le plus perméable, à 29% sur F, G, H, les moins perméables, soit dans le rapport 2 environ, avec des valeurs intermédiaires de 46% pour D, E et de 41% pour A, B.

L'importance de ce transit souterrain, relatif au F, est indiquée ci-après pour chaque bassin.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Transit souterrain global Hn	1,5	1,5	1,9	1,6	1,7	1	1,1	1,1

4.10. Conséquences des pertes et apports souterrains latéraux sur le bilan

Dans les conditions d'altération et d'organisation pédologique reconnues dans ce milieu tropical humide, il est probable que les lignes de crête de la topographie ne correspondent pas toujours avec celles des horizons les moins perméables ou avec celles du socle sain, déterminant ainsi un bassin versant souterrain éventuellement différent du bassin superficiel.

Il convient donc de préciser les conséquences d'apports ou de pertes souterraines sur certains termes du bilan.

Dès lors que le périmètre du bassin s'accroît, pertes et apports d'eaux souterraines tendent à se compenser.

La vidange des nappes Hs et la variation du stock hydrique du bassin + R sont évaluées par différence entre les pluies l'écoulement et l'évapotranspiration, tel que :

$$Hs (+ R) = Pb - He - ETR$$

Des pertes latérales sont donc bien prises en considération et mises au crédit de l'évacuation souterraine, globalement avec celles qui constituent l'inféro-flux dans la zone du thalweg.

Des apports latéraux, si leur localisation est profonde, risquent de surgir en aval de la station hydrométrique, sans modifier le bilan propre du bassin. Au contraire, si leur localisation est plus superficielle, ils peuvent accroître le ruissellement en augmentant l'humectation des sols, mais aussi participer à l'écoulement de base. L'enfoncement du thalweg dans la couverture pédologique apparaît, dans ce cas, déterminant. La présence de cet apport souterrain parasite ne pourrait être mise réellement en évidence par le bilan hydrique que si l'écoulement global devenait supérieur aux pluies diminuées de l'évapotranspiration, le terme (Hs + R) pouvant alors devenir franchement négatif. Ce cas n'a pas été observé à ECEREX. Les plus faibles valeurs du terme Hs (+ R) ont été obtenues sur les bassins F, G, H, les moins perméables, mais aussi les plus enfoncés dans la couverture pédologique, et donc où les thalwegs sont les plus susceptibles de drainer tant des apports souterrains extérieurs que les horizons compacts et d'altération à tarissement lent alimentés par les pluies infiltrées dans le bassin même.

5 - L'EROSION SOUS FORET

Les quantités de sédiments exportées W_t varient entre 0,2 t/ha/an selon les bassins (tableau 2, Fig. 6 et 7). Toutefois, une valeur de 1,1 t/ha/an a été mesurée sur les bassins A en 1978, alors qu'elle n'était que de 0,7 t/ha/an en 1977. Cette valeur maximale, entraînée par un charriage élevé, est peut-être due à l'activité des chercheurs sur le bassin, laquelle s'est intensifiée durant les mois qui ont précédé la déforestation. Excepté ce bassin A, les valeurs maximales sont observées sur les B, H et F. Les valeurs minimales le sont sur le bassin C, le plus perméable.

Il est à signaler que l'érosion des bassins A et C, en Novembre et Décembre 1978, c'est-à-dire immédiatement après la déforestation a été évaluée d'après les corrélations mensuelles établies pour les conditions naturelles. Les valeurs non disponibles en début d'année 1978 sur les bassins D et E, alors que les stations n'étaient pas encore en service, n'ont pas été reconstituées. Il pourrait donc s'agir d'un total annuel par défaut mais les travaux qui ont été réalisés immédiatement à l'amont de ces stations pour la construction des déversoirs ont créé lors des premières crues des apports de sédiments qui doivent compenser dans une certaine mesure les transports non mesurés.

Les quantités exportées en suspension W_s , non mesurées lors de certains événements individuels au cours de l'année, ont été estimées à l'aide des corrélations poids transportés en suspension-lames ruisselées, établies pour chaque bassin avec les résultats obtenus pour les crues échantillonnées.

Les concentrations minimales, observées en fin de phase de tarissement, sont le plus souvent comprises entre 2 et 10 mg/l. Les valeurs maximales, indiquées ci-après pour chaque bassin, ne dépassent guère 300 à 400 mg/l. Elles sont observées au voisinage de la pointe de crue.

C mex.	A	B	C	D	E	F	G	H
1 ^{er}	416	278	112	275	243	270	183	227
2 ^e	342	207	102	259	174	185	170	188

Les quantités maximales exportées (en kg/ha) au cours des crues individuelles sont indiquées ci-après.

Ws max.	A	B	C	D	E	F	G	H
1 ^{er}	35	30	10	26	23	84	44	61
2 ^e	28	26	5	20	19	91	21	27

Les plus fortes valeurs ne dépassent donc pas quelques kilogrammes ou quelques dizaines de kilogrammes.

Il convient également de souligner que l'essentiel de l'exportation annuelle est réalisé lors de quelques dizaines de crues.

L'exportation de matières en suspension varie de 0,04 t/ha/an selon les bassins. Les concentrations extrêmes correspondantes, rapportées aux volumes annuels de ruissellement, étant de 23 mg/l et 60 mg/l.

La concentration et la quantité sont encore minimales sur le bassin C, tandis que celles du bassin F, le plus imperméable, atteignent 48 mg/l et 0,38 t/ha/an, cette dernière valeur étant le maximum observé. La corrélation entre la quantité de suspension exportée et le ruissellement (Fig. 11) laisse d'ailleurs apparaître que la droite représentative du bassin C se distingue nettement d'un faisceau de droites bien groupées, représentatives des autres bassins.

La corrélation, entre les quantités de suspension exportées d'un bassin et celles qui le sont des bassins témoins B et F durant les mêmes crues (Fig. 12), permet une comparaison globale de l'érodibilité des bassins. D'après les coefficients angulaires des droites de corrélation, il ressort le classement par ordre croissant suivant pour les plus fortes crues ($W_s = 12 \text{ kg/ha}$) : d'une part

C	D	E	A	B
0,37	0,49	0,69	1,00	1,00

d'autre part

G	F	H
0,76	1,00	1,04

La comparaison de l'érodibilité de tous les bassins peut être effectuée d'après les corrélations établies à l'échelle mensuelle entre les taux d'exportation (kg/ha) et l'indice de Wischmeyer des averses ayant donné lieu aux crues (Fig. 13, d'après Fig. 7 A) ou l'indice de Wischmeyer de toutes les pluies du mois (Fig. 8 A). Ces deux corrélations semblent aussi bonnes l'une que l'autre et fournissent des conclusions similaires, le classement suivant pouvant être réalisé par ordre d'érodibilité croissante

C E D A B G H F

On retrouve là un classement analogue à celui du ruissellement.

L'exportation de sédiments par charriage, W_c , est comprise selon les bassins entre 0,09 t/ha/an et 0,4 t/ha/an avec une valeur maximale isolée de 0,8 t/ha/an sur le A en 1978. Le charriage minimal est observé sur le C. Ces valeurs de W_c représentent de 23 à 83% de l'exportation totale. Il apparaît donc que les rôles respectifs des deux types d'exportation sont très variables selon les bassins.

Il est ainsi confirmé en Guyane que l'érosion mécanique sous forêt, inférieure à 0,8 t/ha/an, est très faible, en raison de la protection assurée par le réseau de racines, la litière et la voûte forestière.

Les teneurs en éléments dans les eaux de crue sont en moyenne de 10 à 13 mg/l pour les ions, valeurs très légèrement plus faibles que celles des eaux des grandes rivières guyanaises, et de 2 à 4 mg/l de silice dissoute. Les eaux souterraines évacuées hors des bassins doivent avoir des teneurs sensiblement plus élevées. Compte tenu de l'écoulement total, superficiel et souterrain, c'est plus de 0,5 t/ha/an d'éléments dissous qui serait exportée du bassin. Cette estimation préliminaire devrait cependant, pour représenter l'érosion chimique, être diminuée des apports non négligeables en sels d'origine météorique.

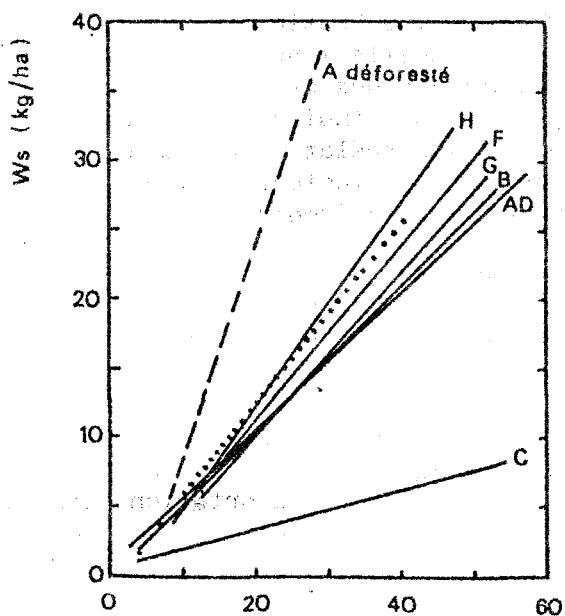


Fig. 11. — Ecérex 1977-1978. Corrélation entre la quantité de matières en suspension exportée et la lame ruisselée sur les différents bassins

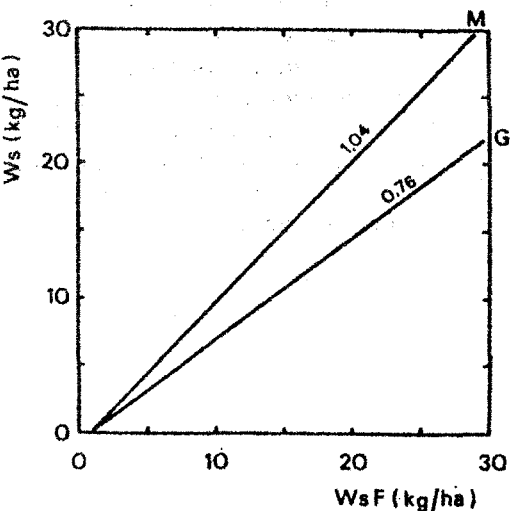
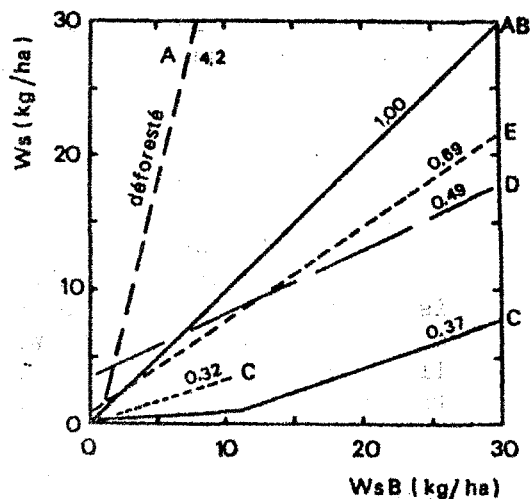


Fig. 13. — Ecérex 1977-1978. Corrélation entre les quantités mensuelles de matières en suspension exportées des bassins et la somme mensuelle des indices de Wischmeyer des averses ayant provoqué un ruissellement (d'après fig. 7 A)

Fig. 12. — Ecérex 1977-1978. Corrélation entre les quantités de suspension exportées d'un bassin et celles qui le sont des bassins témoins B et F durant les mêmes crues (d'après fig. 10 A) les valeurs portées sur les droites correspondent aux coefficients angulaires

6 - CONCLUSION

L'hydrologie superficielle et souterraine ainsi que l'érosion de l'écosystème forestier guyanais ont été étudiées par l'analyse et l'évaluation des différentes phases du cycle de l'eau et des exportations de matières solides et en solution. La comparaison des termes du bilan, ou des corrélations établies entre les termes mensuels ou des caractéristiques pluviométriques d'évènements individuels d'un même bassin ou de deux bassins dont un témoin, permet de disposer des éléments de référence pour suivre les effets de la déforestation et des aménagements qui marqueront le deuxième stade de ce projet.

Selon les bassins, pour une pluviométrie de 3 100 à 3 500 mm par an, le déficit d'écoulement varie de 56 à 90%, l'évapotranspiration assurant de 43 à 47% des pertes. L'écoulement global, de 10 à 44%, se partage entre le ruissellement compris entre 4 à 26% et un écoulement de base variant de 1 à 18%. Les quantités d'eau évacuées hors des bassins par les nappes sont évaluées entre 9 et 46%.

La forte dispersion spatiale de ces valeurs indique des conditions de drainage très différentes selon les sites, mais en accord avec les caractéristiques hydrodynamiques des sols. Des bassins où le drainage vertical est le plus libre à ceux où il est le plus ralenti, le ruissellement augmente ainsi dans le rapport 6 alors que la capacité de rétention diminue dans le rapport 1,3 et le débit des nappes dans le rapport 2.

Ces valeurs relatives, propres à chaque bassin, sont résumées ci-après :

	A	B	C	D	E	F	G	H
Ruissellement Hr	3,7	3,6	1	3,1	2,3	6,1	5,1	5,5
Capacité de rétention Hi	1,2	1,1	1,4	1,2	1,3	1	1,1	1,0
Evacuation souterraine Hs	4,1	4,0	4,9	4,5	4,9	1	1,5	1,5
Écoulement souterrain global Hn	1,5	1,5	1,9	1,6	1,7	1	1,1	1,1

Finalement, par ordre de ruissellement croissant ou de circulation souterraine décroissante, les bassins peuvent être ainsi classés :

		Drainage libre	Drainage mixte		Drainage ralenti type 1		Drainage ralenti type 2		
Ruissellement	Hr	C	E	D	B	A	G	H	F
Capacité de rétention	Hi	C	E	D	A	B	G	H	F
Evacuation souterraine	Hs	C	E	D	A	B	G	H	F
Ecoulement souterrain global	Hn	C	E	D	A	B	G	H	F

Le bassin I semble s'affilier aux D et E, tandis que le J s'apparenterait aux F, G, H.

L'érosion mécanique sous forêt est comprise entre 0,2 et 1,0 t/ha/an selon les bassins, les matières en suspension représentant de 17 à 77% de cette exportation. L'érosion chimique est de l'ordre de 0,5 t/ha/an.

Il convient de souligner l'importance, pour les objectifs d'une telle opération, d'avoir pu prendre en considération des termes du bilan spécifiques des relations eau-sol tels que la capacité de rétention, l'évacuation souterraine, le débit global des nappes du bassin. Ceci nécessitait que soient connues avec une précision acceptable l'évapotranspiration réelle et ses différentes composantes. Les mesures d'interception, d'évaporation sous forêt et d'ETR réalisées en d'autres sites de Guyane ont pu fournir les résultats nécessaires. Il paraît cependant important de continuer à développer, parallèlement aux observations pluvio-hydrométriques, de telles mesures tant sous forêt que sur les bassins versants déforestés et aménagés où des méthodes adéquates sont à adapter.

7 - BIBLIOGRAPHIE

Atlas de la Guyane, 1979.

A tropical rain forest, 1970 - Atomic energy commission. 3 vol.

BOULET R., FRITSCH E., HUMBEL F.-X., 1978 - Méthode d'étude et de représentation des couvertures pédologiques de Guyane française. Sect. Pédol. ORSTOM, 23 p.

BOULET R., BRUGIERE J.-M., HUMBEL F.-X., 1979 - Relations entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane française septentrionale : Conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. Sci. du sol., n° 1, p. 3-17.

BOULET R., 1979 - Cartographie pédologique des bassins versants. Etat d'avancement des travaux et premiers résultats. Bull. liaison DGRST, ECEREX, n° 2, p. 12-18, 3 fig.

DUBREUIL P., 1972 - Recueil des données de base de bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-1969. ORSTOM, 916 p.

DUVIGNEAUD P., 1974 - La synthèse écologique. Dion.

FRITSCH E., 1979 - Etude des organisations pédologiques et représentation cartographique détaillée de quatre bassins versants expérimentaux sur schistes de Bonidoro de Guyane française. Sect. Pédol. ORSTOM, 30 p.

HIEZ G., DUBREUIL P., 1963 - Les régimes hydrologiques de Guyane française. Mém. ORSTOM, 119 p., 49 fig.

HOEPPFNER M., 1974 - Les bassins versants de la Crique Grégoire. Serv. Hydrol. ORSTOM Guyane, 107 p.

HUMBEL F.-X., 1978 - Caractérisation, par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement, de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle, Sci. du sol, n° 2, p. 83-94.

Productivité des écosystèmes forestiers. Ecologie et conservation. Actes Coll. Bruxelles, UNESCO, Paris, 1971.

ROCHE M.-A., 1977 - Hydrodynamique et évaluation du risque de pollution dans un estuaire à marées (Guyane française). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., XIV, 4, p. 345-382, 21 fig.

ROCHE M.-A., 1978 - Objectifs et méthodologie d'étude comparative sur l'hydrologie et l'érosion des bassins versants expérimentaux. ECEREX. Bull. liaison DGRST. N° 1, 8 p., 2 fig.

- ROCHE M.-A., 1979 - Etude sur bassins versants expérimentaux des possibilités d'exploitation et d'aménagement de la forêt amazonienne en Guyane. Conf. Intern. sur l'hydrol. en agri. et l'aménagement de bassins versants dans la zone tropicale, Ibadan, 10 p., 5 fig.
- ROCHE M.-A., 1980 - Evapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane, 9 p., 2 fig.
- SCHNOCK G., 1971 - Le bilan de l'eau dans l'écosystème forêt. Application à une chênaie mélangée de Haute Belgique. Actes Coll. Productivité des écosystèmes forestiers, UNESCO, 1969, Bruxelles, p. 41-47, 2 fig.
- SOLLINS P., DREWRY G., 1970 - Electrical Conductivity and Flow Rate of Water Through the Forest Canopy. A Tropical Rain Forest. U.S. Atomic Energy Commission, III, p. 137-153.
- SOPPER W.E., LUL H.W., 1967 - International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press, 813 p.
- THORNTHWAITTE C.W., 1945 - The Water Balance of Tropical Climates. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 32 p. 116-173.

- 0 - - 0 - - 0 - - 0 - - 0 - -

ANNEXE

TABLEAU 1

ECEREX. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Aire (m ²)	11 500	14 500	14 500	13 300	15 500	14 000	15 000	10 100	11 200	13 700
Périmètre (m)	442	530	465	455	470	475	470	435	410	460
K Gravelius	1,15	1,23	1,08	1,10	1,06	1,12	1,08	1,21	1,08	1,10
Longueur rectangle (m)	137	188	116	113	118	129	113	150	102	115
Largeur rectangle (m)	84	77	125	117	132	109	128	67	110	119
Indice de pente	0,33	0,34	0,47			0,43	0,47	0,39		
Pente maximale (%)	20	17	21	25	29	32	32	20		
Longueur thalweg (m)	170	170	160	110	165	122	140	140		
Pente thalweg (%)	8	9	17	11	15	6	19	10		
Altitude max./déversoir (m)	16	23	28	28		24	28	25		

TABLEAU 2 a

ECEREX. BILAN HYDROLOGIQUE ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS DES BASSINS VERSANTS SOUS FORET PRIMAIRE

	Année 1977			Moyenne 1977, 1978		
	A	B	C	A	B	C
P (référence) (mm)	3 468	3 446	3 510	3 449	3 388	3 417
Hr (mm)	610 17,6%	603 17,5%	226 6%	573 16,6%	552 16,3%	183 5,4%
Hb (mm)	337 9,7%	229 6,6%	252 7,2%	232 6,7%	178 5,3%	221 6,5%
He (mm)	947 27,3%	832 24,1%	478 13,6%	805 23,3%	730 21,5%	404 11,8%
DE (mm)	2 521 72,7%	2 614 75,9%	3 032 86,4%	2 644 76,7%	2 658 78,5%	3 013 88,2%
ETR (mm)	1 470 42,4%	1 470 42,7%	1 470 41,9%	1 470 42,6%	1 470 43,4%	1 470 43,0%
Hi (mm)	2 288 66,0%	2 276 66,0%	2 708 77,2%	2 309 66,9%	2 278 67,2%	2 633 77,1%
Hs (+ R) (mm)	1 051 30,3%	1 144 33,2%	1 562 44,5%	1 175 34,2%	1 188 35,1%	1 543 45,2%
Hn (+ R) (mm)	1 388 40,0%	1 373 39,8%	1 814 51,7%	1 407 40,8%	1 366 40,3%	1 764 51,6%
Ws (kg/ha)	367 50%	343 44%	52 28%	323 36%	288 42%	47 22%
Wc (kg/ha)	370 50%	440 56%	135 72%	580 64%	400 58%	168 78%
Wt (kg/ha) (référence)	737	783	187	903	688	215

TABLEAU 2 b

ECEREX. BILAN HYDROLOGIQUE ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS DES BASSINS VERSANTS SOUS FORET PRIMAIRE

	Année 1978							
	A	B	C	D	E	F	G	H
P (référence) (mm)	3 430	3 329	3 323	3 419	3 364	3 143	3 112	3 158
Hr (mm)	535 15,6%	500 15,0%	140 4,2%	442 12,9%	328 9,8%	806 25,6%	671 21,6%	731 23,1%
Hb (mm)	126 3,7%	127 3,8%	189 5,7%	69 2,0%	29 0,9%	575 18,3%	528 17,0%	522 16,5%
He (mm)	661 19,3%	627 18,8%	329 9,9%	511 14,9%	357 10,7%	1 381 43,9%	1 199 38,6%	1 253 39,6%
DE (mm)	2 769 80,7%	2 702 81,2%	2 994 90,1%	2 908 85,1%	3 007 89,4%	1 762 56,1%	1 913 61,5%	1 905 60,3%
ETR (mm)	1 470 42,9%	1 470 44,2%	1 470 44,2%	1 470 43,0%	1 470 43,7%	1 470 46,8%	1 470 47,3%	1 470 46,6%
Hi (mm)	2 331 68,0%	2 280 62,2%	2 635 79,3%	2 414 70,6%	2 481 73,8%	1 816 57,8%	1 924 61,8%	1 903 60,3%
Hs (+ R) (mm)	1 299 37,9%	1 232 37,0%	1 524 45,9%	1 438 42,1%	1 537 45,7%	292 9,3%	443 14,2%	435 13,8%
Hn (+ R) (mm)	1 425 41,5%	1 359 40,8%	1 713 51,5%	1 507 44,1%	1 566 46,6%	867 27,6%	971 31,2%	957 30,3%
Ws (kg/ha)	278 26%	232 39%	41 17%	300 46%	176 57%	385 72%	288 77%	358 62%
Wc (kg/ha)	790 74%	360 61%	200 83%	355 54%	132 43%	152 28%	87 23%	218 38%
Wt (référence) (kg/ha)	1 068	592	241	655	308	537	375	576

TABLEAU 2 c

ECEREX. BILAN HYDROLOGIQUE ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS DE GROUPES DE BASSINS VERSANTS SOUS FORET PRIMAIRE

	Année 1978				Moyenne 1977, 1978	
	C	D, E	A, B	F, G, H	A, B	C
P (référence) (mm)	3 323	3 392	3 380	3 138	3 419	3 417
Hr (mm)	140 4,2%	385 11,4%	518 15,3%	736 23,5%	563 16,4%	183 5,4%
Hb (mm)	189 5,7%	49 1,4%	127 3,8%	542 17,3%	205 6,0%	221 6,5%
He (mm)	329 9,9%	434 12,8%	645 19,1%	1 278 40,7%	768 22,4%	404 11,8%
DE (mm)	2 994 90,1%	2 958 87,2%	2 735 80,9%	1 860 59,3%	2 651 77,5%	3 013 88,2%
ETR (mm)	1 470 44,2%	1 470 43,3%	1 470 43,5%	1 470 46,9%	1 470 43,0%	1 470 43,0%
Hi (mm)	2 635 79,3%	2 448 72,2%	2 305 68,2%	1 881 59,9%	2 293 67,1%	2 671 78,2%
Hs (+ - R) (mm)	1 524 45,9%	1 488 43,9%	1 265 37,4%	390 12,4%	1 182 34,6%	1 543 45,2%
Hn (+ - R) (mm)	1 713 51,5%	1 537 45,3%	1 392 41,2%	932 29,7%	1 387 40,6%	1 764 51,6%
Ws (kg/ha)	41 17%	238 49%	255 31%	344 69%	305 38%	47 22%
Wc (kg/ha)	200 83%	244 51%	575 69%	152 31%	490 62%	168 78%
Wt (référence) (kg/ha)	241	482	830	496	795	215

LE PROJET ECEREX (Guyane)

ANALYSE DE L'ECOSYSTEME FORESTIER
TROPICAL HUMIDE ET DES MODIFICATIONS
APPORTEES PAR L'HOMME

—o—

G.E.R.D.A.T. (C.T.F.I.)

I.N.R.A.

MUSEUM

D.R.S.T.O.M.

JOURNÉES DE CAYENNE
4-8 MARS 1983