

TROISIÈME PARTIE  
**LES EAUX DE LA RÉGION DU LOCLE**  
PAR ANDRÉ BURGER

CHAPITRE 8

**LES ENSEIGNEMENTS DU BILAN  
ET DU DÉBIT DU BIED DU LOCLE**

*Etablir un bilan dans un système naturel tel qu'un bassin fluvial consiste à en évaluer les mouvements de l'eau, en l'occurrence les entrées et les sorties. Les entrées sont représentées par les précipitations atmosphériques, pluviales et nivales, qui tombent sur le bassin alimentaire préalablement identifié. Les sorties, elles, sont de deux natures: d'abord l'écoulement du cours d'eau que nourrissent les ruissellements superficiels et les sources profondes, puis l'évaporation et la transpiration végétale qui sont importantes surtout en saison chaude, d'où l'importance du rôle de la température.*

*Les observations relatives aux précipitations atmosphériques à La Chaux-de-Fonds, de 1900 à 1993, permettent de caractériser le régime pluvial du Haut-Jura neuchâtelois. Celui-ci n'a marqué, au cours de cette période presque séculaire, aucune tendance à l'accroissement ou à la diminution. De son côté, la température, durant la même période, montre des variations importantes mais qui n'autorisent pas encore à conclure d'une manière péremptoire à un réchauffement du climat.*

*Il existe des cours d'eau dont le bilan n'est pas équilibré: ils écoulent davantage ou moins d'eau que leur alimentation ne le requiert. Le Bied du Locle tient une place remarquable dans cette catégorie. Au cours de fréquentes années, son débit est nettement supérieur à la quantité d'eau – diminuée de l'évaporation – que reçoit son bassin, formé par l'aire d'affleurement de la « Pierre morte » œningienne. Il écoule donc un excédent d'eau, de provenance extérieure, un excédent qui possède la particularité d'être cyclique: de brèves séries d'années, dont le bilan est approximativement normal, alternent avec des séries à forts excédents de débit.*

*Une partie de l'excédent d'eau est, certes, fournie par les ruisseaux allogènes des combes des Enfers et des Entre deux Monts mais, étalée sur l'intervalle d'une année, elle influence peu le bilan.*

*L'étude des anomalies du débit révèle qu'en réalité les excédents sont proportionnels à la hauteur de l'eau souterraine dans les roches calcaires jurassiques qui enve-*

*loppent le noyau des terrains œningiens dont les sources forment Le Bied. Ainsi, plus longtemps cette hauteur dépasse la cote de 945 m, dans le forage profond des Eplatures, plus élevé est l'excédent d'eau écoulé par Le Bied. On se trouve ici en présence d'une interconnexion exemplaire entre deux aquifères, dont l'un suralimente l'autre par voie souterraine.*

*Le régime d'écoulement du Bied est illustré, en particulier, par la fréquence des débits journaliers atteints ou dépassés – les débits classés – durant une année ou plusieurs années. A l'aide d'une méthode statistique appropriée, l'étude de ces débits permet de retrouver la particularité révélée par le bilan, à savoir qu'à partir d'un débit de l'ordre de 0,160 m<sup>3</sup>/s, le régime d'accroissement de la quantité d'eau écoulée augmente et cela, grâce à la suralimentation par l'aquifère jurassique.*

*Une seconde caractéristique du régime d'écoulement est donnée par l'allure de la courbe de débit durant les périodes sans alimentation pluviale ou nivale. Cette courbe exprime une constante du bassin alimentaire: le tarissement plus ou moins rapide du cours d'eau. Le tarissement du Bied se révèle être remarquablement lent, ce qui atteste que l'aquifère œningien possède un fort pouvoir de rétention de l'eau souterraine qui se décharge aux sources. Celles-ci ont donc un débit bien soutenu durant les périodes de sécheresse.*

*Enfin, la courbe de tarissement permet de calculer, à chaque instant, le volume d'eau écoulable emmagasiné dans l'œningien. Ce volume, qui se révèle être élevé, répond du fait que l'approvisionnement en eau potable de la ville du Locle a pu être assuré en tout temps.*

\* \* \*

Pour compléter la physionomie hydrologique du bassin du Locle, il nous faut maintenant chercher à connaître quelles sont les **quantités** d'eau que la nature met en jeu globalement dans les différentes composantes – aériennes, superficielles et souterraines – du mouvement de l'eau. Nous examinerons ainsi successivement **l'alimentation** par les précipitations atmosphériques, le retour d'une fraction de l'eau à l'atmosphère par **l'évaporation** et enfin **l'écoulement** par lequel l'eau excédentaire quitte le bassin du Locle.

Ces trois facteurs sont les composantes du **cycle naturel** que l'eau accomplit à la surface de la terre: évaporation à partir des mers et des terres – transport de la vapeur d'eau par l'atmosphère – précipitations – accumulation et écoulement sur les terres, en surface et en sous-sol – retour à la mer. Le moteur puissant qui entretient cet incessant mouvement est le soleil, par le biais de l'énergie thermique qu'il confère à l'atmosphère et à la surface de la terre.

## PRÈS D'UN SIÈCLE D'OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES À LA CHAUX-DE-FONDS

Depuis l'année 1900, la pluie et la neige – à côté d'autres facteurs météorologiques – sont mesurées à La Chaux-de-Fonds. Nous disposons ainsi de données qui couvrent pratiquement le XX<sup>e</sup> siècle et cela, en un lieu dont l'altitude et le site orographique sont bien représentatifs du Haut-Jura neuchâtelois.

Avant de nous arrêter aux particularités du bassin-versant du Bied, il vaut donc la peine de rechercher quelques caractéristiques du **climat régional** qu'illustrent les observations de La Chaux-de-Fonds pour une période **séculaire**, précisément celle qui est la plus fréquemment considérée dans la prévision des événements hydrologiques extrêmes.

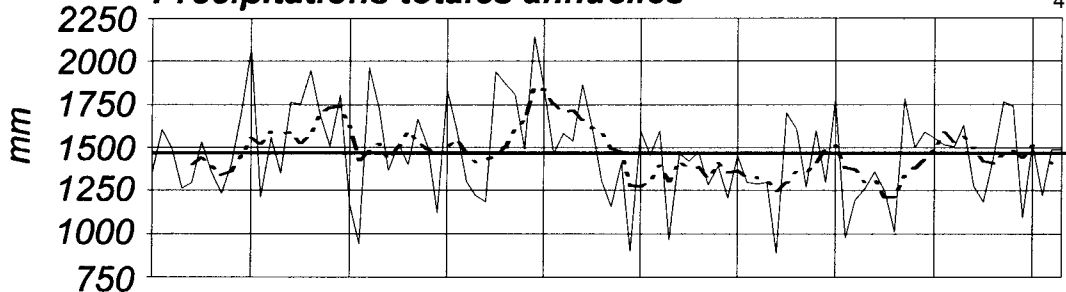
### Les précipitations atmosphériques régionales

Les trois premiers graphes de la figure 8.1 (p. 192) illustrent la variation pluri-annuelle de trois des caractéristiques du régime des précipitations qui ont trait particulièrement au bilan hydrologique. Le tableau ci-dessous en résume les valeurs moyennes et certaines valeurs extrêmes.

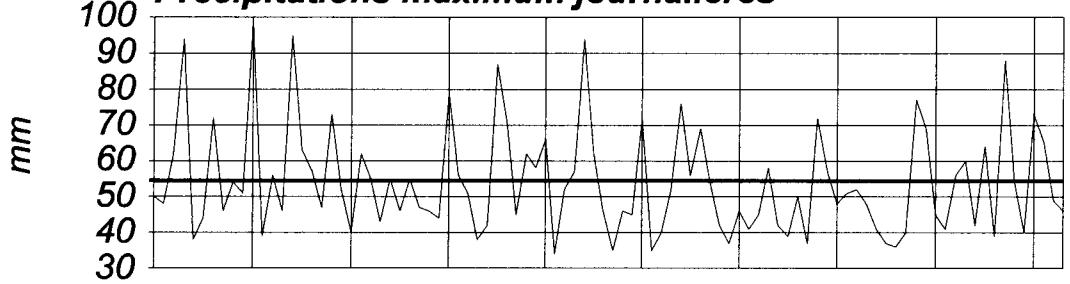
	La Chaux-de-Fonds		Le Locle 1963-1992	Les Brenets 1963-1992
	1900-1992	1963-1992		
	mm	mm	mm	mm
Moyenne de 93 ans	1469	—	—	—
Moyenne de 30 ans	—	1410	1503	1458
Année la plus pluvieuse	2143 (1939)	1785 (1977)	1864 (1988)	1821 (1977)
Année la moins pluvieuse	887 (1964)	887 (1964)	962 (1964)	987 (1965)
Moyenne mensuelle	122	118	125	121
Maximum journalier	99 (1910)	88 (1987)	80 (1987)	77 (1978)
Altitude	1018 m	1018 m	920 m	875 m

**Tableau 1** Valeurs caractéristiques des précipitations atmosphériques à La Chaux-de-Fonds, au Locle et aux Brenets.

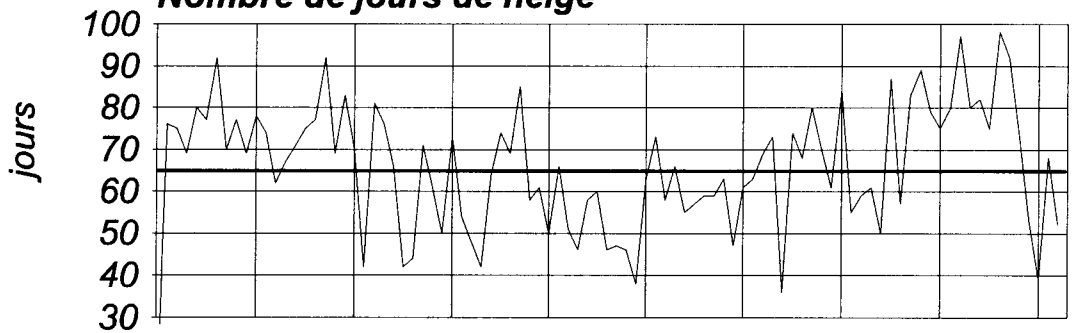
### Précipitations totales annuelles



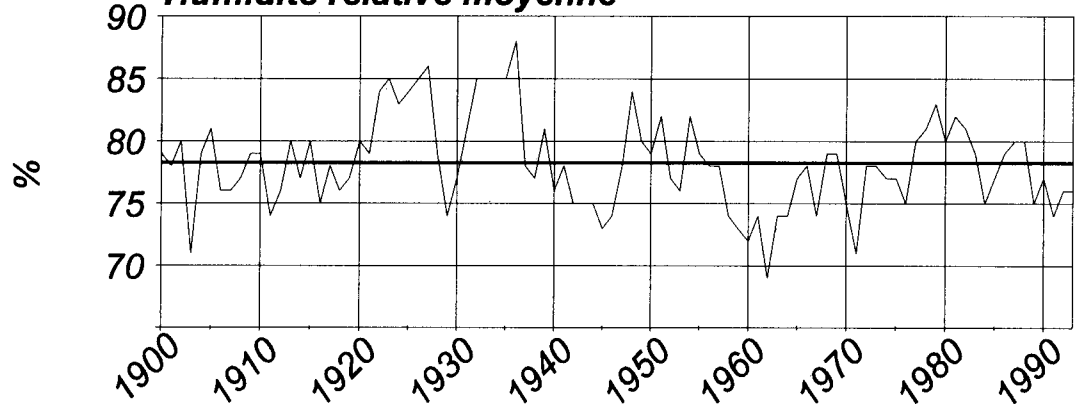
### Précipitations maximum journalières



### Nombre de jours de neige



### Humidité relative moyenne



— Moyenne de la période

Années

A propos des précipitations moyennes annuelles, les valeurs de la figure ci-contre indiquent une forte dispersion, au sein de laquelle les tendances pluri-annuelles sont soulignées par la ligne dite des moyennes mobiles, ligne qui amortit les variations. Chacun des points de celle-ci illustre la moyenne de l'année en cours et des quatre années qui la précèdent. Elle fait apparaître des groupes d'années alternants, nettement supérieurs ou inférieurs à la moyenne. Une formulation statistique de cette «cyclicité» sera donnée plus bas.

La moyenne générale de 1469 mm recouvre des variations extrêmes comprises entre 2143 mm au maximum et 887 mm au minimum. A l'échelle séculaire donc, il peut tomber 2,4 fois plus d'eau en année humide qu'en année sèche et l'année la plus sèche est inférieure de 63% à la moyenne générale. Cette variabilité élevée est conforme à celle d'autres régions jurassiennes voisines et se retrouvera dans le débit du Bied.

Les hauteurs de pluie s'expriment dans l'unité internationale du **millimètre**, épaisseur d'une lame d'eau uniformément distribuée. L'usage se répand de les désigner communément en  $l/m^2$ , valeur plus suggestive. Une lame de 1 mm correspond à  $1 l/m^2$ .

Quant aux chutes journalières les plus élevées de chacune des années, elles varient aléatoirement et illustrent un maximum séculaire de 99 mm, tandis que leur moyenne s'établit à 54 mm.

La ligne représentant le nombre de jours pendant lesquels il a neigé illustre la grande irrégularité de la conjonction des précipitations neigeuses et de la température données à la figure 8.2, p. 197, de même que des anomalies comme le minimum de 1964 et le maximum de 1986.

En outre, de 1971 à 1989, les hauteurs de neige tombée ont fait l'objet de mesures complétant ainsi l'image de l'hiver à La Chaux-de-Fonds. Durant ces dix-neuf années elles furent en moyenne de 335 cm avec des extrêmes de 153 cm en 1972 et de 640 cm en 1981. Pour les besoins de l'étude du bilan hydrologique du bassin du Locle nous en avons extrait l'enneigement de **chaque hiver** (soit de la période septembre-avril), donné au tableau 5 (p. 206).

Ces épaisseurs se rapportent à la neige nouvellement tombée et mesurée chaque matin. La neige fraîche subit un tassement naturel rapide qui réduit de beaucoup son épaisseur après quelques jours déjà. Elle immobilise à la surface du sol une quantité d'eau équivalente qui échappe temporairement au cycle de l'écoulement.

◁ **Fig. 8.1** Précipitations atmosphériques, nombre de jours de neige et humidité relative, moyennes annuelles, à La Chaux-de-Fonds, de 1900 à 1993.

## Quelques événements singuliers

Les traits généraux de la pluviosité régionale tirés des séries annuelles ne renseignent guère sur l'occurrence d'épisodes pluvieux exceptionnels, ceux qui frappent particulièrement l'observateur et qui suscitent des problèmes souvent alarmants: les périodes de surabondance de pluie ou de neige et celles de sécheresse prolongée.

Les séries pluvieuses exceptionnellement abondantes font l'objet de statistiques par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, statistiques dans lesquelles elles apparaissent sous la forme de **fréquences de retour**. Le tableau ci-dessous rend compte des maxima de précipitations tombées pendant des séries de jours croissantes, entre 1900 et 1987. Ils peuvent être regardés comme proches des maxima séculaires, valeurs considérées comme caractéristiques d'une région donnée. Ils appellent les commentaires suivants:

- les séquences pluvieuses les plus abondantes sont celles de septembre à janvier. C'est aussi la période au cours de laquelle l'évaporation et la transpiration végétale passent par leur minimum et par conséquent, où les crues des ruissellements superficiels et des sources sont les plus violentes;
- 1910 fut l'«année du siècle» par sa séquence pluvieuse extrême de 223 mm à La Chaux-de-Fonds, du 17 au 21 janvier. Cette valeur approche la fréquence de retour séculaire. Dans cet ordre d'idées, d'ailleurs, La Chaux-de-Fonds figure le plus souvent en tête des trois stations comparées sur le tableau.

Durée de l'épisode	La Chaux-de-Fonds		Le Locle		Les Brenets	
	Date (1900-1987)	P (mm)	Date (1944-1987)	P (mm)	Date (1901-1987)	P (mm)
1 jour	19.01.1910	98	09.12.1954	90	11.11.1950	84
2 jours	18-19.01.1910	170	25-26.09.1987	155	18-19.01.1910	143
5 jours	17-21.01.1910	223	22-26.09.1987	168	16-20.01.1910	186
1 mois	Novembre 1950	451	Novembre 1950	507	Novembre 1950	485
3 mois	Nov.-janv. 1944	791	Oct.-déc. 1952	772	Oct.-déc. 1923	781
1 an	1939	2143	1952	1878	1927	2028

**Tableau 2** Précipitations atmosphériques extrêmes en fonction de la durée des périodes pluvieuses.

Le mois de janvier 1910 fut mémorable par la gravité des inondations qui eurent lieu dans tout le canton et dont un écho figure dans *Le Rameau de Sapin* de 1910. L'ampleur en fut particulièrement grande dans le Val de Travers, comme en témoigne la gravure ci-dessous.



Inondations à Travers,  
en 1910 (*Le Rameau de  
Sapin*, mai 1910).

Il est regrettable que la durée des périodes sans pluie ne fassent pas l'objet d'une même statistique. A titre d'orientation, pour les cinquante années de 1905 à 1954, à La Brévine, les deux extrêmes furent de trente-deux jours sans pluie, l'un en octobre-novembre et l'autre en février-mars. Pour l'utilisation des eaux souterraines et des sources, il convient donc de tablez sur des productions minimales d'automne et d'hiver susceptibles de se produire au terme d'un mois sans pluie.

## La température de l'air

En plus de sa signification pour le bilan hydrologique dont elle détermine le facteur évaporation, la température moyenne de l'air représente le paramètre le plus sensible et le plus explicite des changements climatiques. Il était donc intéressant d'aborder cette question sur la base des nonante-quatre années d'observation suivies à La Chaux-de-Fonds.

Les moyennes annuelles de température représentées à la figure 8.2 (p. 197) illustrent des variations interannuelles qui subissent à la fois un accroissement et un changement de distribution remarquables, que met en lumière la ligne

des moyennes mobiles de cinq années, déjà utilisée pour les précipitations (cf. p. 193). L'année 1944 apparaît comme une année-charnière. Antérieurement, les moyennes mobiles se situent au-dessous de la moyenne séculaire et dessinent des ondulations de petite amplitude, avec une tendance légèrement montante. Cette dernière dénote un faible réchauffement, statistiquement égal à  $0,05^{\circ}\text{C}$  par dix ans.

Après 1946, les ondulations interannuelles commencent à passer au-dessus de la moyenne séculaire, en accroissant leur amplitude et leur écartement. La tendance reste ascendante jusqu'en 1972, date à laquelle s'installe un notoire refroidissement qui s'achève en 1987. Un écart considérable de  $3,3^{\circ}\text{C}$  entre les valeurs annuelles extrêmes marque la période. L'approche statistique ci-dessous précisera cette variabilité.

Les extrêmes des maxima et minima journaliers:  $+33,6^{\circ}\text{C}$  (1983) et  $-29,9^{\circ}\text{C}$  (1985), très proches dans le temps, accusent un écart considérable de  $63,5^{\circ}\text{C}$ . Quant aux moyennes des extrêmes journaliers, elles s'écartent de  $34,1^{\circ}\text{C}$ .

## A propos des variations climatiques

Les variations naturelles à longs et à courts termes du climat se succèdent d'une manière cyclique. La «cyclicité» peut se reconnaître dans les faits tels que, par exemple, les sept périodes glaciaires qui ont été identifiées au cours des derniers huit cent mille ans ou le petit âge glaciaire du XVII<sup>e</sup> siècle succédant à une période relativement chaude culminant autour du XII<sup>e</sup> siècle. Ces dernières variations sont attestées par diverses archives portant sur des sujets aussi variés que la date des vendanges ou la navigabilité des canaux hollandais. Par ailleurs, la mémoire individuelle garde trace de changements locaux sensibles (par exemple des hivers plus rigoureux au tournant du dernier siècle), mais ces impressions sont largement subjectives et peuvent être biaisées par le fait que les conditions de vie de l'époque étaient plus dures et rendaient l'homme plus sensible à l'hostilité du milieu.

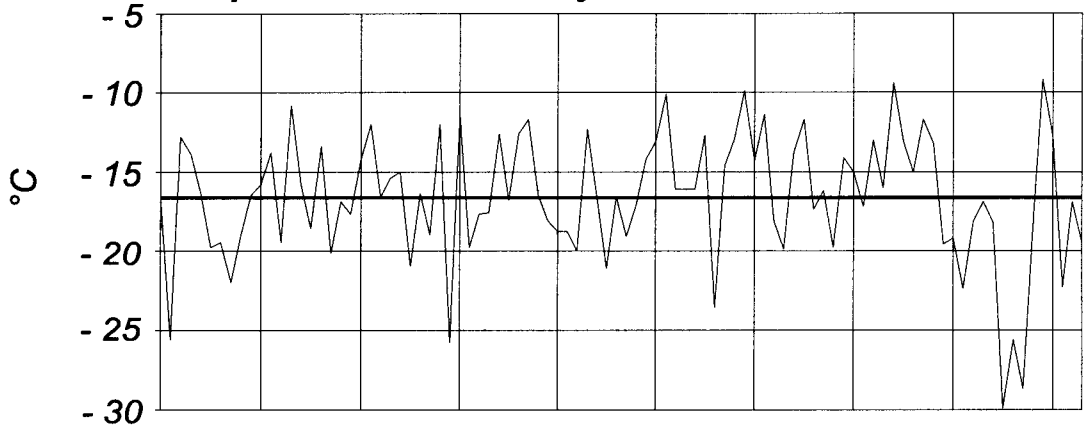
L'arsenal des méthodes statistiques permet actuellement de quantifier l'évolution climatique en termes de «cyclicité» et de tendances. D'une étude dense

Fig. 8.2 Températures annuelles à La Chaux-de-Fonds, de 1900 à 1993.

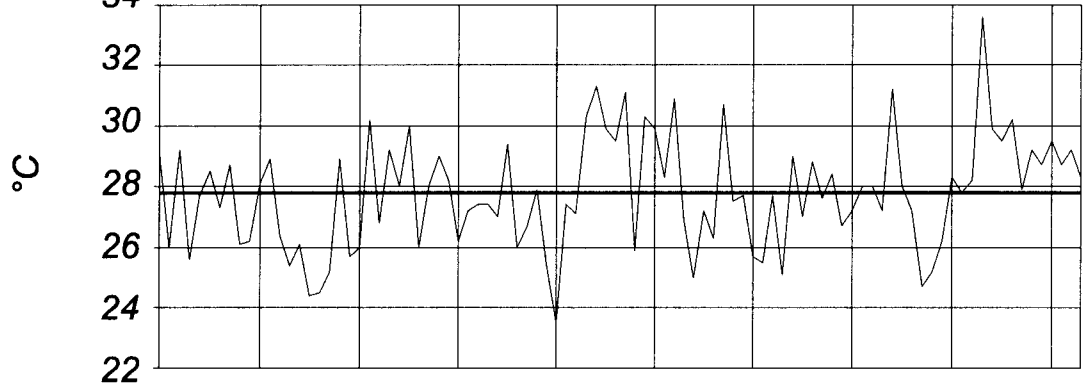


### Températures minimales journalières

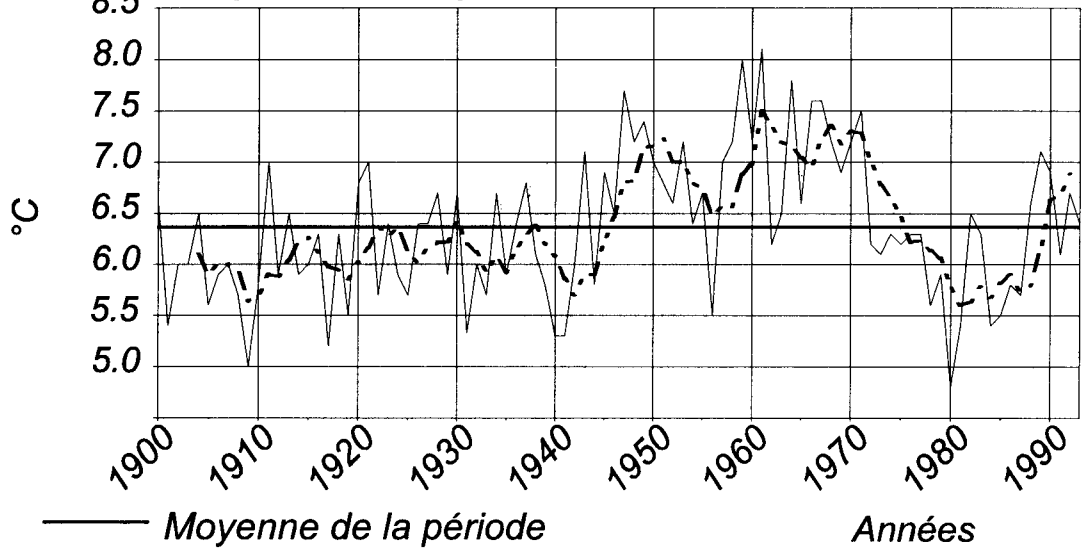
9



### Températures maximales journalières



### Températures moyennes annuelles



et rigoureuse que vient de faire M. Francesco Kimmeier (1996), chercheur au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, nous extrayons quelques constats qui éclairent la question.

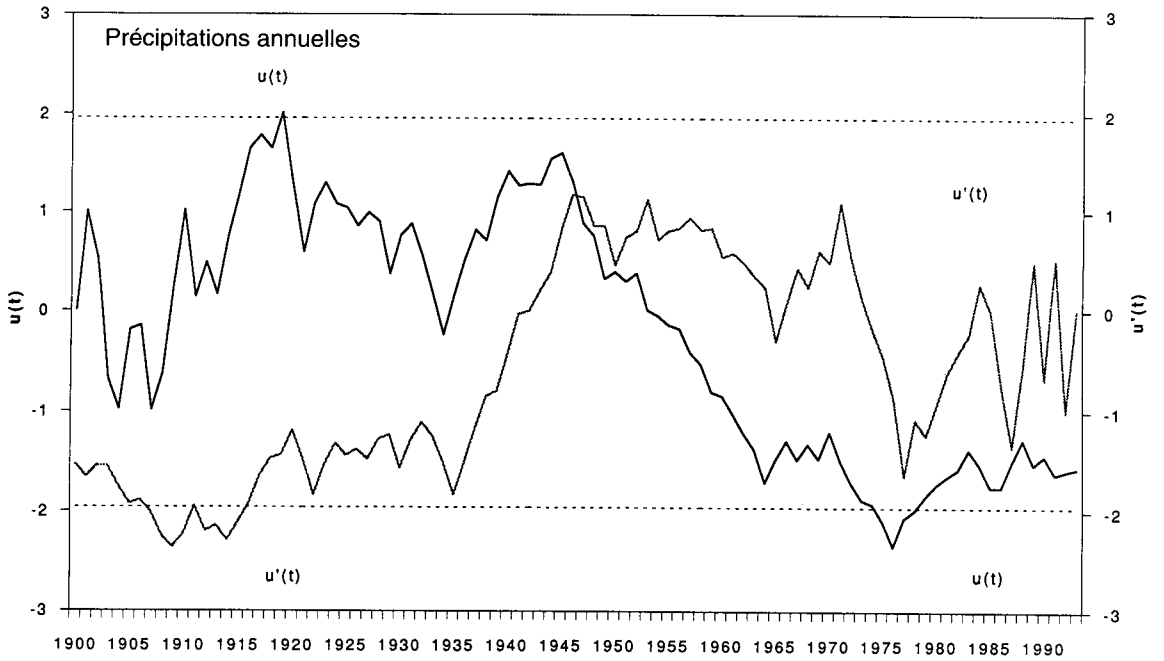
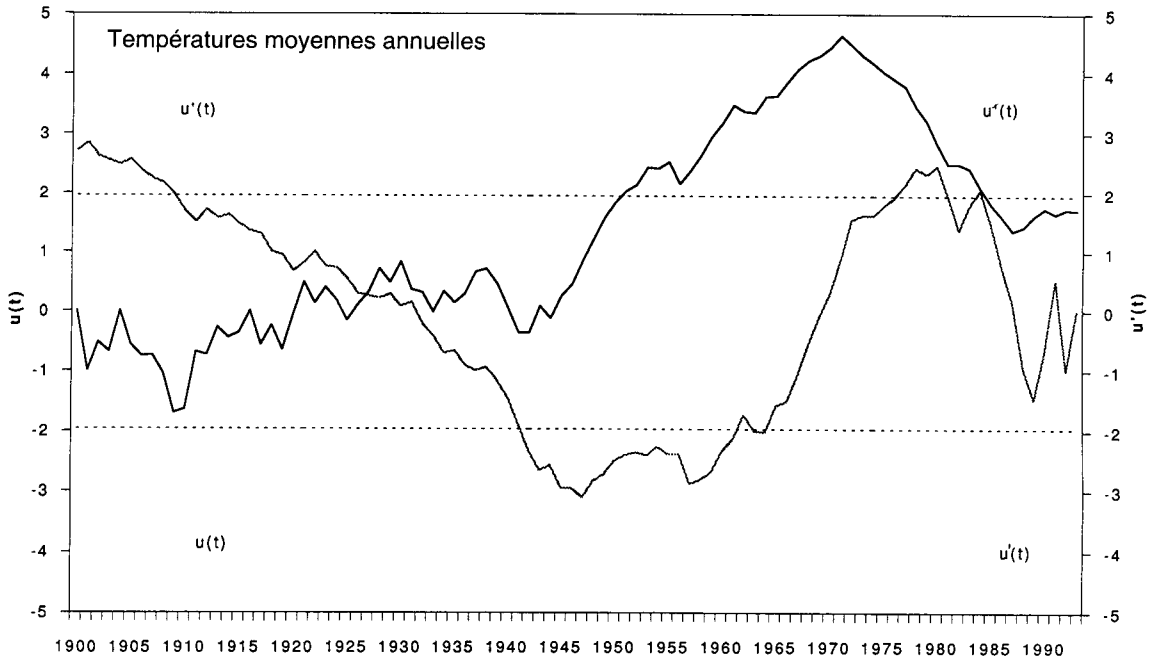
Les cycles que l'analyse permet de reconnaître, durant la série limitée à nonante-quatre ans d'observations à La Chaux-de-Fonds, sont exprimés dans la dernière colonne du tableau 3 (p. 200) pour les différents paramètres examinés. La température moyenne obéit à des cycles courts de six ou sept ans et à un cycle long de soixante-cinq ans (qui demande à être confirmé par les données des années à venir). Pour les précipitations atmosphériques moyennes, seuls apparaissent des cycles courts, compris entre quatre et huit ans. Deux cycles longs de soixante et soixante-cinq ans caractérisent le nombre des jours de neige et l'humidité relative de l'air.

Les tendances, c'est-à-dire les évolutions positives ou négatives des paramètres pour la durée totale des nonante-quatre ans, sont approchées par le test statistique de Kendall, qui est particulièrement bien approprié. A l'intention des spécialistes, précisons que le calcul se concrétise par une représentation graphique sur laquelle figurent deux courbes dites «prograde» et «rétrograde» (fig. ci-contre). Si ces lignes restent comprises entre les valeurs, dites critiques, de l'intervalle de confiance au seuil de signification de 0,05 % (ou 95 %), représentées par des ordonnées de + 1,96 et - 1,96, il n'existe pas de tendance à l'échelle de temps considérée. Pour qu'une tendance s'affirme, il convient que la dernière valeur au moins dépasse 1,96. Dans cette figure, illustrant les cas de la température et des précipitations atmosphériques, l'intersection des lignes indique le début de l'apparition d'une tendance de courte durée (ici de trente ans pour la température). Pour les deux paramètres, les dernières valeurs de la série prograde sont inférieures à la valeur critique (tableau 3, p. 200), ce qui s'interprète comme une absence de tendance au cours des nonante-quatre années. Toutefois, un autres test (Spearman) incline à conférer une tendance positive à la température, tendance que confirment les trois stations de Neuchâtel, Chaumont et La Brévine pour lesquelles la hausse des températures moyennes annuelles est avérée.

En ce qui concerne le nombre des jours de neige, ils furent inférieurs d'environ vingt jours en moyenne, dans les années cinquante, par rapport au début et à la fin de ce siècle. Ce minimum est lié à l'existence d'un cycle d'une soixantaine d'années.

Les données de ce tableau identifient les périodes de baisse et d'augmentation statistiques des six paramètres considérés. Seules les températures annuelles maximum et l'humidité relative de l'air indiquent une tendance affirmée, respectivement positive et négative.

Fig. 8.3 Températures moyennes annuelles et précipitations annuelles à La Chaux-de-Fonds (1018 m), entre 1900 et 1993: valeurs progressives de la statistique de Kendall. ▷



Paramètre	Test de Kendall	Tendance		Baisse depuis	Augmentation depuis	Cycles (ans)
		Long terme	Court-moy. termes			
Température moyenne annuelle	1,71	(oui)	oui	1927-1943 1973-1987	1944-1972 1974-1993	6, 7, (65)
Température maximum annuelle	2,10	oui	oui	—	1980-1993	8, 23
Température minimum annuelle	-0,08	non	oui	1910-1948 1979-1993	1949-1978	6-7, 21-34
Précipitations annuelles	-1,56	non	oui	1947-1977	1978-1993	4, 8
Précipitations maximum annuelles	-1,53	non	oui	1927-1977	1978-1993	4
Nombre de jours de neige	0,07	non	oui	1920-1957	1958-1993	4, 8, 60
Humidité relative	-2,49	(oui)	oui	1940-1976 1986-1993	1977-1985	4, 65

**Tableau 3** Elaboration statistique des données météorologiques de La Chaux-de-Fonds pour la période de 1900 à 1993.

En résumé, **trois conclusions** se dégagent de cette élaboration :

- Au cours des nonante-quatre années étudiées, les précipitations moyennes et maximum ne marquent aucune tendance à l'accroissement ou à la diminution.
- Une tendance à l'augmentation ressort nettement des températures annuelles maximum et, probablement aussi, des températures moyennes, sous réserve de vérification durant les années à venir. Pour ces dernières, la tendance séculaire est actuellement masquée par un cycle de soixante-cinq ans.
- Quant au nombre des jours de neige, s'il ne montre pas une tendance séculaire, il indique que « les hivers d'antan » ont existé entre 1920 et 1953 sous la forme de fréquence de jours mais pas nécessairement de quantité hivernale de neige.

## LES PRÉCIPITATIONS ET LA TEMPÉRATURE MOYENNES DANS LE BASSIN-VERSANT DU BIED DU LOCLE

Par rapport à ce qui vient d'être exposé, quelques différences ressortent de la région du Locle, du fait de son relief déprimé et de son altitude un peu inférieure. Il y existe des mesures homogènes de précipitations et de température pour les trente et une années qui vont de 1963 à 1993, un intervalle de temps qui permet de tirer des valeurs proches des moyennes à long terme.

### Les précipitations atmosphériques moyennes

Leurs caractéristiques apparaissent sur le tableau suivant:

Station	Altitude (m)	Précipitations 1963-1993 (mm)	
		mesurées	calculées*
Les Brenets	875	1458	1333
Le Locle	920	1503	1365
La Chaux-de-Fonds	990	1410	1416

**Tableau 4** Valeurs comparées des précipitations atmosphériques.

(\*) Valeurs théoriques calculées à l'aide d'une formule de Uttinger (1951), basée sur l'accroissement des précipitations avec l'altitude, dans le Jura.

Les précipitations observées et calculées sont proches l'une de l'autre à La Chaux-de-Fonds; elles confirment ainsi leur représentativité à l'échelle régionale.

Au Locle, ainsi que dans une moindre mesure aux Brenets, les précipitations sont supérieures à celles de La Chaux-de-Fonds, à l'encontre de la loi d'accroissement avec l'altitude qu'illustrent les hauteurs calculées. L'excès de 138 mm est imputable au caractère de dépression orographique de la région locloise, qui suscite un accroissement local de la densité pluviale. Ce phénomène est fréquemment observé dans le Jura, notamment dans le cirque de Saint-Sulpice, dans les gorges de L'Areuse et probablement aussi aux Brenets.

La dispersion régionale des précipitations annuelles conduit à la nécessité de calculer, pour chaque bassin fluvial quelque peu étendu, une **hauteur moyenne** de la pluviosité. L'accroissement des précipitations avec l'altitude constitue le critère principal de pondération des données des stations locales.

Pour le bassin œningien du Bied et de ses environs, l'influence du facteur altitudinaire est négligeable par rapport à celle de la singularité orographique des lieux. Des mesures effectuées au Locle, à 920 m et aux Trembles, à 1140 m, ont donné des lames d'eau équivalentes (Burger, 1988). Les précipitations observées au Locle – qui s'écartent nettement de celles de La Chaux-de-Fonds – peuvent donc, sans risque d'erreur supérieure à celle de l'imprécision des mesures, être retenues comme valeurs moyennes pour l'ensemble du bassin du Bied.

La température moyenne, en revanche, obéit à la loi de la décroissance due à l'altitude avec, cependant, un écart très faible par rapport à celle de La Chaux-de-Fonds: 0,17° C. Pour les besoins du bilan hydrologique du Bied, les moyennes annuelles et saisonnières du Locle sont donc acceptables.

## LE BILAN DU BIED DU LOCLE

### Introduction

L'équation générale du bilan, usuellement établi à l'échelle annuelle ou pluriannuelle, a la forme suivante:

$$Q = P - ETR \pm dq$$

- $Q$  est le débit moyen annuel du Bied mesuré à La Rançonnière;
- $P$  sont les précipitations annuelles totales, pluie et neige, tombées sur le bassin-versant de l'œningien;
- $ETR$  regroupe les pertes d'eau par l'évaporation et la transpiration végétale;
- $dq$  représente un facteur correctif, positif ou négatif, qui tient compte de particularités propres au bassin-versant, telles que des pertes d'eau au profit d'un bassin adjacent ou des gains d'eau extérieure. Il exprime aussi la différence qui existe fréquemment entre les volumes d'eau retenus dans le bassin entre le début et la fin de la période considérée; à l'échelle d'une longue série d'années, la valeur de cette différence devient négligeable;

*Pe<sub>eff</sub>* sont les précipitations annuelles efficaces, c'est-à-dire les précipitations totales diminuées de l'évapotranspiration réelle:  $Pe_{eff} = P - ETR$ . Elles alimentent l'écoulement.

## Le débit du Bied

Le débit du Bied du Locle est enregistré depuis 1965 à la station fédérale de jaugeage de La Rançonnière, située immédiatement en aval de l'usine hydro-électrique, avant les pertes dans les calcaires du Dogger. Les moyennes annuelles données au tableau 5 (p. 206) présentent entre elles des écarts considérables que le bilan expliquera.

La station mesure tous les apports émanant de l'Éningien ainsi que les ruissellements occasionnels parvenant des combes argoviennes affluentes. L'eau des sources captées qui transite par le réseau d'eau potable revient au Bied, légèrement retardée, par la voie des égouts. Depuis la construction de la station d'épuration du Col des Roches, toutes les eaux usées sont recueillies par un collecteur spécial, aussi Le Bied à ciel ouvert ne conserve-t-il plus, à l'étiage, que des eaux « propres », les eaux de l'Éningien non captées. Elles proviennent d'émissaires superficiels et artésiens que saisissent des drainages, et du trop-plein des sources captées. Par temps pluvieux, il s'y joint les eaux de ruissellement, notamment les ruissellements urbains. Au cours des périodes de sécheresse, le débit naturel du Bied « propre » se maintient, avant la jonction du collecteur des égouts au Col des Roches, à 30 l/s soit à 2600 m<sup>3</sup> par jour.

Les mesures n'ont pas fait, jusqu'ici, l'objet d'une élaboration scientifique. Celles des quelques premières années paraissent entachées d'erreurs, aussi le bilan sera-t-il limité aux vingt-cinq années hydrologiques qui s'étendent d'octobre 1968 à septembre 1993.

Les apports des combes argoviennes ne constituent, on le verra, qu'une très faible fraction du débit du Bied à l'échelle annuelle. Le **bassin-versant** pris en compte pour le bilan sera donc celui de l'Éningien dont l'aire d'affleurement – en d'autres termes, l'aire alimentaire – mesure 8,9 km<sup>2</sup>.

## Le calcul du bilan

Le bilan est calculé en lames d'eau tombée, évaporée et écoulee, uniformément distribuées sur le bassin-versant (tableau 5, p. 206). Les débits  $Q$  et  $dq$  sont

donc transformés en lames d'eau annuelles. En outre, le bilan est établi pour des **années hydrologiques**, différentes de l'année civile, et qui vont du mois d'octobre d'une année donnée à septembre de l'année suivante. Elles présentent l'intérêt de couvrir toute la période hivernale, c'est-à-dire de ne pas scinder la réserve d'eau accumulée temporairement sous forme de neige.

L'évaporation physique et la transpiration végétale sont groupées sous le nom d'**évapotranspiration**. Une distinction est faite entre l'évapotranspiration maximum ou **potentielle** (abrégée par ETP) qui se produirait si le sol était constamment saturé en eau et l'évapotranspiration **réelle** (ETR) qui tient compte du fait que le taux d'humidité du sol est souvent déficitaire. C'est naturellement l'évapotranspiration réelle, inférieure à l'évapotranspiration potentielle, qui est prise en compte dans l'équation du bilan.

L'évapotranspiration réelle n'est pas mesurable directement. Parmi les nombreuses formules qui permettent de la calculer, nous avons retenu celle de Turc qui est fiable. Elle relie simplement ETR aux précipitations et à la température. La valeur moyenne obtenue de 460 mm est très proche de celle qu'a trouvée Delarozière (1968) pour le bassin du Haut-Doubs.

Les données nécessaires au calcul du bilan, pour les **années hydrologiques**, sont rassemblées dans le tableau 5 (p. 206). En outre, elles sont représentées graphiquement à la figure ci-contre. Durant les vingt-cinq années hydrologiques retenues, le **débit moyen annuel** fut de 0,35 m<sup>3</sup>/s. Des variations inter-annuelles anormalement grandes le caractérisent: les extrêmes atteignirent 0,50 m<sup>3</sup>/s (en 1970) et 0,19 m<sup>3</sup>/s (en 1972), soit un rapport de 1 à 2,6. Durant les crues, le **débit de pointe** atteint 11 m<sup>3</sup>/s.

## L'existence d'un excédent d'eau

Un regard jeté sur la colonne des valeurs de  $dq$  décèle immédiatement que ce facteur varie fortement d'une année à l'autre, signifiant que le débit s'écarte plus ou moins de la hauteur des précipitations efficaces. Le bilan du Bied œningien peut être considéré comme **équilibré** durant les périodes où  $dq$  n'excède pas un écart de 10% par rapport au débit annuel – un écart imputable à la précision relative des mesures. C'est le cas des années 1972-1974 et 1983-1987. En revanche, durant toutes les autres années,  $dq$  présente une valeur positive signifiant que Le Bied écoule des excédents d'eau. Ceux-ci sont clairement visualisés (par le segment de colonne noir) à la figure ci-contre. Un maximum de

## Précipitations totales - Evapotranspiration calculée - Débits du Bied - Excédent d'écoulement

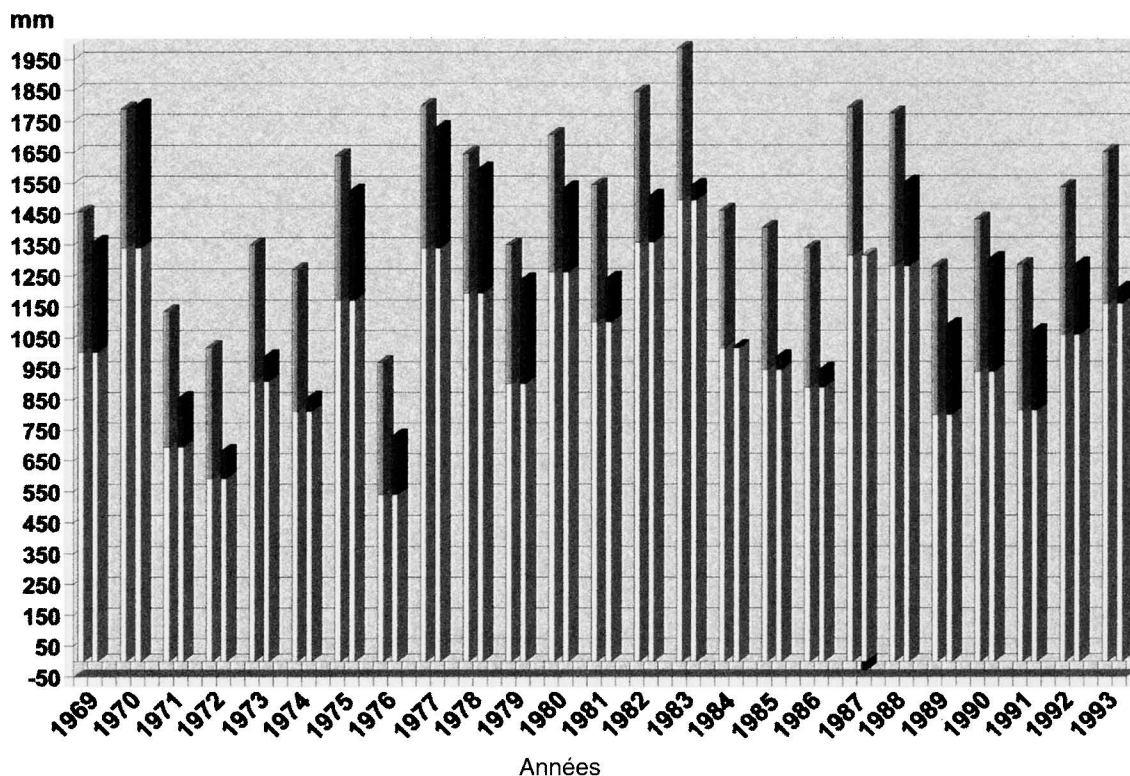


Fig. 8.4 Représentation graphique des éléments du bilan du Bied du Locle pour les vingt-cinq années hydrologiques de 1969 à 1993. Pour chaque année, la colonne de gauche représente la hauteur totale des précipitations atmosphériques (P) et, dans la section supérieure, l'eau soustraite par l'évapotranspiration réelle (ETR). La colonne de droite donne, dans sa section inférieure, le débit du Bied correspondant aux précipitations efficaces (P-ETR) et dans sa section supérieure (en noir), l'excédent de débit (dq).

461 mm, soit le 26% du débit total, a lieu en 1970. Le nombre des années au cours desquelles le bilan de l'Éningien est **non équilibré** et fortement excédentaire apparaît être anormalement élevé. Par comparaison avec les autres cours d'eau jurassiens, l'ampleur de cette anomalie surprend et intrigue.

Année hydrol.	P (mm)	Q		ETR Turc (mm)	$P_{eff}$ (mm)	$dq$ (mm)	T. moy. (°C)	Neige fraîche (cm)
		(m³/s)	(mm)					
1969	1456	.383	1358	453	1003	355	6,42	112
1970	1790	<b>.508</b>	<b>1801</b>	450	1340	<b>461</b>	6,10	118
1971	1134	.241	854	439	695	159	6,37	101
1972	1017	<i>.192</i>	<i>681</i>	<i>425</i>	592	89	6,06	121
1973	1349	.279	989	440	909	80	6,07	157
1974	1270	.241	855	459	811	44	4,90	95
1975	1639	.430	1525	467	1172	353	6,79	<b>159</b>
1976	<i>969</i>	.206	730	429	<i>540</i>	190	6,38	138
1977	1800	.488	1730	460	1340	390	6,44	124
1978	1646	.450	1596	451	1195	401	6,21	146
1979	1349	.349	1238	448	901	337	6,37	118
1980	1707	.433	1535	445	1262	273	5,95	147
1981	1544	.350	1241	443	1101	140	5,99	137
1982	1845	.425	1507	487	1358	149	7,32	150
1983	<b>1986</b>	.435	1543	492	<b>1494</b>	49	7,43	126
1984	1460	.288	1021	444	1016	5	6,08	142
1985	1405	.279	989	458	947	42	6,67	109
1986	1340	.267	947	450	890	57	6,45	147
1987	1780	.363	1287	464	1316	-29	6,57	152
1988	1776	.438	1553	<b>495</b>	1281	272	7,65	121
1989	1280	.308	1092	479	801	291	7,63	129
1990	1432	.368	1305	492	946	365	<b>7,85</b>	<i>46</i>
1991	1286	.302	1071	472	814	257	7,33	—
1992	1537	.363	1287	477	1060	227	7,20	87
1993	1652	.341	1209	491	1161	48	7,58	—
Moyenne 1969-93	1498	.349	1238	460	1038	200	6,71	125

**Tableau 5** Données relatives au bilan du Bied, de 1969 à 1993. Les maxima de la période sont imprimés en chiffres gras et les minima en italique.

Le calcul des débits spécifiques moyens, c'est-à-dire des débits rapportés à l'étendue des bassins alimentaires, met immédiatement en lumière l'anomalie que représente Le Bied. Ils sont :

- pour L'Areuse: 12,6 m<sup>3</sup>/s pour 373 km<sup>2</sup>, soit 34 l/s/km<sup>2</sup>
  - pour Le Bied: 0,35 m<sup>3</sup>/s pour 8,9 km<sup>2</sup>, soit 39 l/s/km<sup>2</sup>
- Le débit spécifique du Bied dépasse de 15 % celui de L'Areuse mesuré aux Moyats, pour des précipitations atmosphériques de hauteurs pratiquement identiques.

## Les causes possibles

Elles sont à rechercher dans trois directions différentes:

1. des erreurs importantes entachent les mesures; elles sont dues à des conditions d'observation difficiles, particulièrement pour les débits;
2. l'apport des combes argoviennes est significatif;
3. une alimentation occulte de l'CEningien s'opère à partir de l'aquifère des calcaires du Malm.

### *L'imprécision des mesures*

Les mesures du débit du Bied semblent avoir subi quelques avatars durant les premières années mais, depuis 1969, elles paraissent cohérentes et non entachées d'erreurs grossières auxquelles pourrait être imputée la forte variabilité de  $dq$ .

La corrélation entre les précipitations atmosphériques et le débit, de 1969 à 1993, prend la forme suivante:

$$\frac{Q \text{ (mm)} = 314 + 1,04 \cdot P \text{ (mm)}}{\text{coefficient de corrélation } r = 0,88}$$

Elle présente un terme constant positif de 314 mm qui est marqué principalement par l'évapotranspiration.  $Q$  et  $P$ , liés par le facteur 1,04, dénotent une progression parallèle. Le coefficient de corrélation élevé affirme la bonne qualité de la relation  $P-Q$ , excluant pratiquement l'existence d'importantes aberrations dans les mesures.

### *L'apport des combes argoviennes*

C'est seulement à l'occasion des crues que les torrents des combes des Enfers (photo A, p. 168a) et des Entre deux Monts parviennent au Bied du Locle. En moyennes et basses eaux, ils disparaissent totalement par infiltration dans les calcaires jurassiques de leurs semi-cluses.

D'une étude spéciale effectuée entre septembre 1986 et octobre 1987, soit au cours d'une année hydrologique à précipitations sensiblement supérieures à la

moyenne (tableau 5, p. 206), il est ressorti que l'apport des deux combes au Bied, étalé sur les quatorze mois d'observation, se résume à 0,5-0,8 l/s (Burger, 1988). Une limite par excès de 5% du débit du Bied a été attribuée à la contribution annuelle des deux combes.

Durant les vingt-cinq années de notre bilan, en l'absence de toute autre donnée sur cette contribution, et pour tenter de mettre en lumière une possible relation entre celle-ci et les excédents  $dq$ , il était raisonnable de supposer que la majeure partie du ruissellement dans les combes a lieu durant la saison froide, particulièrement à la fonte des neiges. Cependant, aucune corrélation n'apparaît entre les hauteurs totales de neige de chaque hiver (tableau 5) et  $dq$ . En revanche, un semblant de relation lie les précipitations hivernales et  $dq$ , sans toutefois qu'il soit possible de l'attribuer à une cause distincte de l'effet général de la saison froide sur l'ensemble des écoulements. La conclusion semble s'imposer que l'apport de combes argoviennes n'explique pas les grandes variations inter-annuelles des excédents d'écoulement du Bied.

### *La suralimentation de l'œningien par l'aquifère du Malm*

Les données du tableau 5 et surtout la figure 8.4 (p. 205) attestent que le bilan de l'œningien est approximativement **équilibré** durant les périodes de 1972 à 1974 et de 1983 à 1987. Cette particularité attire l'attention sur l'éventualité d'une variation cyclique de  $dq$ . Avant et après chacune des deux périodes, l'excédent de débit augmente puis diminue d'une manière quasi progressive, ce qui renforce l'hypothèse d'une périodicité:  $dq$  exprimerait ainsi la succession d'**états hydrologiques pluriannuels** de hautes et de basses eaux, lesquels dépendraient du volume de l'eau souterraine emmagasinée dans le synclinal du Locle.

Au sein de l'aquifère du Malm, les périodes de niveaux élevés traduisent aussi un emmagasinement élevé de l'eau souterraine; les périodes de niveaux bas, le contraire. Les fluctuations de l'état hydrologique sont donc reflétées par les variations du niveau piézométrique.

Dans le forage des Eplatures, les niveaux maximum de l'aquifère du Malm excèdent la cote de 970 m, altitude supérieure à la base des couches œningiennes. Virtuellement, en périodes d'abondance d'eau, des flux du Malm peuvent pénétrer dans le noyau synclinal œningien à la faveur de zones de fractures transversales et contribuer à en enrichir les circulations longitudinales, élevant d'autant le débit des sources du Locle. Ce processus, possible dans la région des Eplatures, pourrait l'être aussi à l'extrémité occidentale du synclinal, là où se

trouve la zone de transition hydraulique entre les aquifères de la vallée de La Brévine et du Locle, décrite plus haut (cf. p. 165).

Cette hypothèse s'est trouvée fortement corroborée par une comparaison du niveau d'eau dans le forage des Eplatures et l'excédent d'écoulement  $dq$ . A cette fin, une statistique de la durée des niveaux atteints ou dépassés dans le forage, durant les dix années hydrologiques de 1969 à 1978, a été dressée.

La valeur de  $dq$  de chaque année hydrologique a été ensuite comparée à la durée de chaque catégorie de niveau. Il en est ressorti un lien fortement marqué entre la durée en jours des niveaux égaux ou supérieurs à 945 m,  $N_{j>945}$ , d'une part et  $dq$ , d'autre part, ce qu'exprime l'équation de régression suivante:

$$\frac{dq \text{ (mm)}}{\text{coefficient de corrélation } r} = 78 + 4,1 \cdot (N_{j>945})$$

coefficient de corrélation  $r = 0,80$

Elle signifie que l'excédent d'écoulement du Bied,  $dq$ , est proportionnel au nombre de jours durant lequel le niveau d'eau a atteint ou dépassé la cote de 945 m, soit un niveau de 70 m sous la vallée. La moyenne pluriannuelle de ce paramètre est égale à 40,2 jours. Pour ce laps de temps, l'équation donne une valeur de  $dq$  égale à 250 mm, valeur un peu supérieure à la moyenne de 200 mm fournie par le bilan (tableau 5, p. 206). Le coefficient de corrélation, élevé, serait sans doute affiné si l'on disposait d'un suivi plus précis des niveaux dans le forage.

Le calcul conduit à valider l'hypothèse que le bilan du Bied dépend effectivement de la valeur de l'emmagasinement de l'eau dans le Malm, au cours de périodes interannuelles. Il est **équilibré** pendant les périodes où le niveau piézométrique dans le Malm, au sondage des Eplatures, reste inférieur à 945 m. Il est d'autant plus **excédentaire** que la durée des périodes de niveaux supérieurs à cette cote est plus grande. Il convient d'observer encore que la réciproque, c'est-à-dire le déversement de l'eau de l'œningien dans le Malm en basses eaux, est probablement insignifiant puisque aucune valeur négative importante de  $dq$  n'apparaît durant les vingt-cinq années d'étude.

Les excédents de débit du Bied œningien illustrent d'une manière exemplaire l'existence de variations pluriannuelles de la réserve d'eau emmagasinée dans les calcaires jurassiques supérieurs et permettent même d'en donner, indirectement, une expression quantitative. Ainsi l'apport d'eau extérieure à la cuvette du Locle renforce la pertinence de la distinction de riche **oasis** qui lui est dévolue.

Une même inertie hydraulique dans la variation de la réserve en eau des calcaires a déjà été pressentie et mise en lumière pour le bassin de la source de L'Areuse, par plusieurs chercheurs du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (en particulier, Tripet, 1972).

## LE RÉGIME D'ÉCOULEMENT DU BIED

### La distribution des débits

Le régime d'un cours d'eau est globalement reflété par la fréquence des débits moyens journaliers qu'il écoule, dans un intervalle de temps donné. La liste dite des **débits classés**, c'est-à-dire des débits journaliers atteints ou dépassés, annuellement ou pour toute la durée des mesures, est donnée par l'*Annuaire hydrographique de la Suisse*. En ce qui concerne Le Bied du Locle, elle couvre la période de trente et un ans allant de 1964 à 1994. L'approche statistique la plus suggestive des débits classés consiste à les interpréter en terme de **fréquence** d'occurrence.

La méthode se résume à les transposer sur un graphe qui porte, en abscisse, le logarithme des débits et en ordonnée, les pourcentages cumulés des débits, sur une échelle de probabilité. La figure ci-contre présente le résultat de cette démarche, effectuée pour Le Bied du Locle ainsi qu'à titre de comparaison, pour la source de La Noiraigue, à l'aide d'une grille probabiliste calculée par A. Mangin (1971).

La ligne représentative de la source de La Noiraigue porte une rupture de pente vers le haut, à partir du débit de  $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$ . Au-dessus de cette valeur, le régime d'accroissement du débit se réduit, ce qui signifie qu'un autre exutoire – sans doute un exutoire souterrain vers un bassin adjacent – entre en activité et calme la montée en crue de la source.

Le Bied du Locle montre, sur le graphe de la figure ci-contre, une importante rupture de pente vers le bas de la ligne représentative des débits classés. Cette cassure signifie qu'au-dessus du point de rupture, vers  $0,160 \text{ m}^3/\text{s}$ , le régime d'accroissement du débit augmente très sensiblement. L'aquifère œningien commence à évacuer un débit excédentaire d'eau de provenance allogène. Il ne peut s'agir que de la suralimentation à partir de l'aquifère du Malm qui a été mise en lumière par l'examen du bilan.

Les deux démarches conduisent donc au même constat: l'aquifère de l'œningien est enrichi par celui des calcaires du Malm, en périodes de hautes eaux, et ce processus commence à enfler Le Bied du Locle, à partir d'un débit approchant en moyenne  $0,160 \text{ m}^3/\text{s}$ .

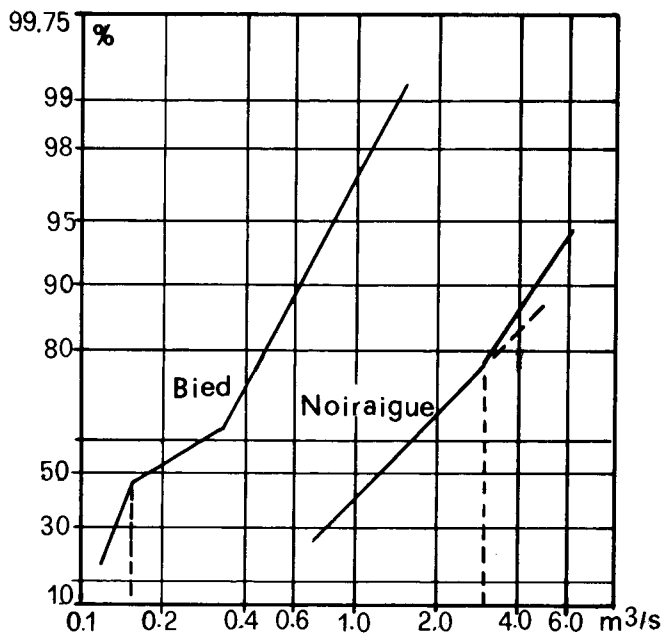


Fig. 8.5 Distribution des débits classés du Bied du Locle et de la source de La Noiraigue sur une échelle de probabilité.

### Le régime de tarissement

Au terme d'une série pluvieuse et de la crue qu'elle provoque, le débit des cours d'eau subit une décroissance continue. Au-delà de quelques jours après la pointe, le régime d'écoulement se tranquillise et se régularise. Il est qualifié alors de **régime non influencé** (par l'alimentation pluviale) et, dès ce moment, il obéit à une loi dite de **tarissement** qui est, en première approximation, une fonction constante pour toutes les décrues d'un même cours d'eau, une fonction ne dépendant plus que des propriétés physiques du milieu aquifère qui en nourrit les sources.

Pour Le Bied du Locle, une période non influencée d'une durée exceptionnelle a eu lieu du 8 septembre au 7 novembre 1969, soit durant soixante et un jours, pendant laquelle il ne se produisit que de faibles averses. La courbe de décroissance du débit correspondante est représentée par le graphe de la figure 8.6 (p. 212) dont l'échelle des ordonnées porte le logarithme des débits. Ce mode de représentation met en évidence deux périodes distinctes : une **décruce rapide** qui va de la pointe moyenne journalière du 8 septembre (la pointe absolue

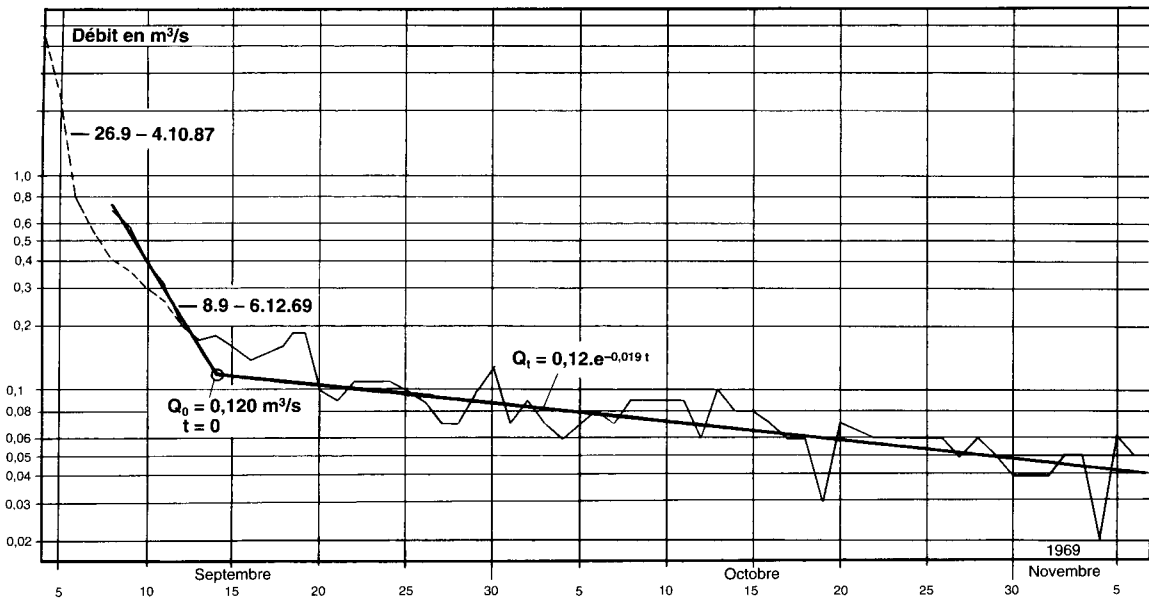


Fig. 8.6 Décrue et tarissement du Bied, durant la période non influencée du 8 septembre au 6 décembre 1969.

est plus élevée mais ne dure que quelques heures) jusqu'au 13 septembre. Puis succède la période de **tarissement** proprement dite qui s'installe, après quelques turbulences dues à de faibles pluies, le 20 septembre et dure jusqu'au 7 novembre. Une **ligne droite** peut être ajustée aux débits journaliers de toute cette période de quarante-huit jours. Elle exprime le fait que la fonction de tarissement est simplement exponentielle. Elle est analogue au régime d'écoulement d'un réservoir d'eau qui se viderait par un orifice situé à sa base.

### *La courbe de décrue*

La courbe de décrue est normalement marquée encore par des influences du régime pluvial antécédant, particulièrement par des ruissellements hypodermiques qui demandent quelques jours pour devenir négligeables. Dans le cas du 8 au 13 septembre, ses valeurs représentatives sont alignées selon une **droite** inclinée qui exprime une décroissance simplement exponentielle des six débits journaliers concernés. Mais il s'agit là d'une singularité particulière. En règle générale, la décrue obéit à une loi plus complexe que certains auteurs recommandent d'approcher à l'aide d'une fonction hyperbolique (voir, à ce sujet, Kiraly, 1976).

La décrue du 26 septembre au 4 octobre 1987, donnée sur le graphe à titre de comparaison, présente une allure plus « normale » et plus générale.

### *La courbe de tarissement*

Durant le temps écoulé entre le 14 et le 20 septembre, la transition du régime de décrue au régime de tarissement est confuse en raison de quelques faibles pluies tombées les 17 et 18 septembre. Il est acceptable, dans ce cas, de fixer le passage d'un régime à l'autre au jour et au débit de l'intersection des deux droites ajustées, soit le 14 septembre. Le débit théorique du début du tarissement est alors de  $0,120 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'expression algébrique de la droite de tarissement ajustée par corrélation est :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

$Q_0$  est le débit au temps  $t = 0$ , soit le 14 septembre, avec une valeur de  $0,120 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $e$  est la base des logarithmes naturels, égale à  $2,718 \dots$ ;  $\alpha$  est le **coefficient de tarissement**, un exposant qui exprime algébriquement la pente de la droite; il est négatif du fait que les débits décroissent. Sa valeur, de  $-0,019$ , est plus faible, par exemple, que celle du tarissement de la source de L'Areuse, qui vaut  $-0,026$ . Il signifie que la décroissance du débit du Bied en régime non influencé, en d'autres termes, la vidange de la réserve d'eau souterraine de l'Éningien, est particulièrement lente.

La pente particulièrement faible de la droite de tarissement du Bied, à la figure ci-contre, signifie que le réservoir aquifère de l'Éningien possède un **pouvoir de rétention élevé**, ce qui assure à ses sources un débit relativement soutenu durant les périodes de sécheresse. Cette propriété n'est pas étrangère au fait que l'approvisionnement en eau potable de la ville ait pu, tout au long des années passées, être assuré par les seules ressources de l'Éningien.

### La valeur de la réserve souterraine de l'Éningien

A partir de l'amorce du tarissement qui est, rappelons-le, une caractéristique approximativement constante du bassin-versant, l'équation qui le décrit permet de calculer le volume de l'eau en réserve dans l'aquifère qui alimente les sources. Plus exactement, il s'agit de la **réserve écouable**, c'est-à-dire de l'eau située **au-dessus** du niveau des sources et qui est susceptible de les alimenter jusqu'à leur total assèchement. Elle concerne bien l'Éningien seul, puisque la sur-

alimentation par les calcaires jurassiques n'entre en jeu qu'à partir de 0,160 m<sup>3</sup>/s, soit au-dessus du débit considéré à l'origine du tarissement. Le tableau suivant illustre le régime de décroissance du débit et de la réserve écoulable pour des périodes non influencées de un, deux et trois mois durant lesquels les pluies feraient totalement défaut :

Temps écoulé, en jours	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>60</i>	<i>90</i>
Débit du Bied, en m <sup>3</sup> /s	0,160	0,132	0,090	0,051	0,029
Réserve, en milliers de m <sup>3</sup>	546	450	309	173	100
Lame équivalente, en mm	56	46	36	18	10
Source de L'Areuse, en mm	41	32	19	9	4

**Tableau 6** Evolution du débit du Bied et de la réserve écoulable de l'œningien en période non influencée, depuis le début du tarissement; comparaison avec celle du réservoir souterrain de la source de L'Areuse.

L'intérêt du calcul réside notamment dans le fait qu'il permet une comparaison entre différents bassins sourciers. Par rapport à celle de la source de L'Areuse, mais aussi plus généralement, la réserve écoulable du bassin du Bied est sensiblement plus élevée et son rythme de vidange, plus lent. Une fois encore se trouvent mises en lumière les qualités exceptionnellement bonnes du réservoir aquifère œningien.