

<b>Zeitschrift:</b>	Ingénieurs et architectes suisses
<b>Band:</b>	112 (1986)
<b>Heft:</b>	12
<b>Artikel:</b>	Estimation spatiale des précipitations dans l'ouest de la Suisse par la méthode du krigeage
<b>Autor:</b>	Jordan, Jean-Pierre / Meylan, Paul
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-75990">https://doi.org/10.5169/seals-75990</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Estimation spatiale des précipitations dans l'ouest de la Suisse par la méthode du krigage

par Jean-Pierre Jordan et Paul Meylan, Lausanne

Qu'il s'agisse de drainage, d'irrigation, de défense contre les crues ou encore de protection des sols contre l'érosion, les paramètres hydrométéorologiques constituent, de toute évidence, l'information primaire, le premier maillon de la chaîne d'opérations qui conduisent au dimensionnement des ouvrages d'aménagements ruraux. Cette position clef exige qu'un grand soin soit apporté à leur estimation. A quoi bon, en effet, avoir recours à des modèles de simulation très performants, comme l'autorisent les moyens informatiques actuels, s'il subsiste une large imprécision à leur égard.

Or aujourd'hui encore, le projeteur d'aménagements ruraux ne dispose que d'informations ponctuelles fournies par le réseau de stations hydrométéorologiques réparties sur le territoire suisse. Dans la plupart des cas, il procède par interpolation linéaire pour évaluer l'un ou l'autre des paramètres dans la région soumise à son intervention.

Pour combler cette lacune, le présent article propose une méthode basée sur le krigage pour régionaliser le module pluviométrique interannuel et les précipitations journalières extrêmes. Il fournit pour la Suisse occidentale la carte du module pluviométrique interannuel, trois cartes des pluies journalières de divers temps de retour et la carte du gradex concernant ces dernières. Des exemples d'utilisation sont également présentés dans la dernière partie de ce travail.

## 1. Démarche suivie

La méthode de régionalisation utilisée lors de cette étude comporte différentes étapes, dont voici les principales :

- déterminer la valeur des paramètres caractéristiques des pluies journalières extrêmes ( $P_5$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  et gradex) en un certain nombre de stations ;
- rechercher une liaison entre ces paramètres et la morphométrie ;
- interpoler, par la méthode du krigage, en chaque nœud d'une grille régulière les variations des paramètres ou résidus qui ne s'expliquent pas par une relation avec la morphométrie ;
- combiner en chaque nœud les résidus avec la hauteur de précipitation fonction de la morphométrie ;
- cartographier par interpolation linéaire les différents paramètres en traçant des lignes de même valeur à partir de la grille régulière.

Le krigage, méthode d'interpolation aux nœuds d'une grille à partir d'un semis de points irrégulièrement répartis, a de nombreux avantages sur les autres méthodes d'interpolation. Parmi ces avantages, nous retenons que l'estimateur de la valeur recherchée est optimal (de variance minimale), et que d'autre part, il est possible d'y associer une variance d'estimation.

Comme les pluies journalières extrêmes (résultats d'une analyse statistique) sont entachées d'une erreur non stationnaire, mais connue, la méthode classique de krigage est légèrement modifiée et donne lieu à une nouvelle formulation faisant intervenir la notion de vario-gramme structural [14]<sup>1</sup>.

Les données utilisées pour cette étude sont les pluies journalières des stations du réseau d'observation de l'Institut suisse de météorologie (ISM) et un modèle digital du terrain à mailles de 250 m.

## 2. Résumé des études existantes

La régionalisation des précipitations mesurées ponctuellement à un certain nombre de stations n'est pas un problème nouveau. De nombreuses études et applications ont déjà été entreprises en la matière. En voici une rapide description, non exhaustive :

La première étude de régionalisation en Suisse fut la cartographie manuelle du module pluviométrique interannuel d'Uttenger [19]. Plus récemment, citons l'Atlas climatologique de la Suisse édité par l'Institut suisse de météorologie qui donne également une représentation des modules pluviométriques en Suisse sur la période de 1931 à 1970. La carte a été établie par interpolation manuelle après le calcul de différents gradients pluviométriques.

L'étude de F. Zwahlen [22] présente la tentative de cartographier quelques éléments du bilan hydrique sur le bassin versant de la Mentue (canton de Vaud), notamment les précipitations saisonnières. La méthode des anomalies, utilisée dans cette étude, consiste à décomposer la pluviométrie en deux fonctions. La première fonction rend compte de la relation pluie-morphométrie, tandis que la deuxième fonction considère les résidus à cette première fonction comme une variable régionalisée [12]. La relation

## Zusammenfassung

Sei es für Ent- oder Bewässerungen, Hochwasser- oder Erosionsschutz, in jedem Fall stellen die hydrometeorologischen Parameter die primäre Information dar, d.h. das erste Glied der verschiedenen Operationen die zur Dimensionierung landwirtschaftlicher Einrichtungen führen. Diese Polposition verlangt selbstverständlich eine entsprechende Sorgfalt in deren Abschätzung. Es ist in der Tat sinnlos auf perfektionierte Modelle zurückzugreifen, was mit den heutigen Informatikkenntnissen durchaus möglich ist, solange zu grosse Unsicherheit in Bezug auf die hydrometeorologischen Daten besteht.

Auch heute noch verfügt der Planer jedoch nur über punktweise Kenntnisse dieser Parameter, welche ihm durch das über die Schweiz verteilte hydrometeorologische Messstationennetz geliefert werden. In den meisten Fällen arbeitet er dann mittels linearer Interpolation um den entsprechenden Parameter für seine Studie zu ermitteln.

Um diese Lücke zu schliessen, schlagen wir im folgenden Artikel eine auf der Kriging-Methode basierende Regionalisierung der mehrjährigen Niederschlagsmodulen, sowie der extremen Tagesniederschläge vor. Wir liefern somit für die Westschweiz eine Karte der mehrjährigen Niederschlagsmodulen, drei Karten für Tagesniederschläge verschiedener Wiederkehrperioden sowie deren «Gradex»-Karte. Am Schluss der Arbeit sind einige Anwendungsbeispiele aufgeführt.

pluie-altitude est calculée non en fonction de l'altitude propre de la station, mais en fonction de l'altitude moyenne d'une fenêtre centrée sur le pluviomètre. Nous nous sommes en partie inspirés de cette étude, mais en cartographiant toutefois d'autres paramètres et à une autre échelle.

En France, de nombreuses études sur la régionalisation des pluies extrêmes ont été entreprises. Le Laboratoire d'hydrogéologie et d'hydraulique appliquée de l'Ecole nationale supérieure de géologie de Nancy a, par exemple, travaillé sur la cartographie des pluies journalières décennales et le gradex en France du Nord-Est [5 et 6]. L'approche est semblable à celle de Zwahlen. Un soin particulier a été donné au choix de l'expression de l'altitude représentative du site où s'effectuent les observations. Les auteurs ont essayé de caractériser l'orientation des versants et l'encaissement du site de mesure.

D'autre part, ils ont renoncé à cartographier le gradex annuel pour présenter deux cartes de gradex saisonniers, été et hiver. Nous vérifierons que, en Suisse également, la série des maximums annuels de pluies journalières à une station n'est pas homogène (voir également [17]).

L'Institut de mécanique de l'Université de Grenoble entreprend, depuis quelque temps déjà, plusieurs études sur la spatialisation des hauteurs de pluies extrêmes dans les Cévennes. Th. Lebel [10] suggère

<sup>1</sup>Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

### Le krigage

Le *krigage* est une méthode d'estimation de la valeur  $z_o$  en un point  $x_o$  d'une variable  $Z$ , à partir de la valeur  $z_i$  mesurée en un certain nombre de points  $x_i$  distincts de  $x_o$ . Il s'agit donc d'une méthode d'*interpolation*. Son origine (et son nom) remonte aux travaux du géologue sud-africain D. G. Krige dans les années 1950 concernant l'évaluation des teneurs de gisements miniers. A l'Ecole des Mines de Paris, G. Matheron a repris les idées de Krige pour les généraliser et leur donner une assise théorique : la *théorie des variables régionalisées* (V. R.).

Matheron donne la définition suivante : « Le problème du krigage consiste à trouver la meilleure estimation possible de la variable régionalisée  $Z$ , compte tenu de l'information disponible, c'est-à-dire des valeurs déterminées sur un certain nombre d'échantillons<sup>1</sup>. Le plus souvent le krigage revient à effectuer une pondération des échantillons, ... les poids étant calculés de façon à rendre minimale la variance d'estimation résultante, compte tenu des caractéristiques géométriques du problème. En gros, comme cela est naturel, le krigage attribue des poids faibles aux échantillons éloignés et inversement. Il n'est naturellement possible de résoudre un problème de krigage... qu'à la condition de faire certaines hypothèses sur les caractéristiques statistiques du gisement étudié. »

Pratiquement, l'estimateur du krigage s'écrit :

$$\hat{z}_o = \sum I_i z_i$$

où les  $z_i$  sont les valeurs mesurées de la V. R. Zen un certain nombre de points  $x_i$ , et les  $I_i$  sont les poids calculés par résolution des équations du krigage.

Même si la variable  $Z$  est considérée comme une variable aléatoire dans la théorie des variables régionalisées de Matheron, elle doit, pour que l'estimation de  $z_o$  soit possible, répondre à certaines caractéristiques de *stationnarité*<sup>2</sup> et de *structure*<sup>3</sup> sur le domaine étudié.

Sous l'une de ses formes, le krigage utilise une hypothèse moins restrictive que celle de la stricte stationnarité de la variable régionalisée  $Z$ : il s'agit de l'*hypothèse intrinsèque* qui stipule que ce sont les deux premiers moments (au sens statistique) des accroissements de la V. R.  $Z$  entre deux points distants de  $h$ , et non ceux de la variable Zelle-même, qui sont stationnaires. Cette hypothèse s'écrit donc :

1.  $E(Z_x - Z_{x+h}) = M(h)$
2.  $\text{Var}(Z_x - Z_{x+h}) = 2 g(h)$

ces deux moments sont bien indépendants de  $x$  et ne dépendent que de la distance  $h$  séparant deux points donnés.

Dans ces deux relations,  $M(h)$  est la fonction de dérive linéaire,  $E(Z_x) = m(x)$  est la *dérive* (ou espérance de  $Z$ ) au point  $x$  et  $g(h)$  est le *variogramme* (appelé également fonction intrinsèque).

L'étude du variogramme est souvent appelée *étude structurale*: le variogramme est en effet un puissant moyen de mise en évidence du comportement de la variable régionalisée  $Z$ . En particulier il permet de définir :

- a) la *portée* du phénomène : distance à partir de laquelle les corrélations s'éteignent ;
- b) la nature *isotropique* ou *anisotropique* de la V. R. ;
- c) la nature de la *continuité* de la V. R. dans l'espace, qui peut être une variable purement aléatoire (aucune structure spatiale) ou une variable extrêmement régulière (très forte structure spatiale). La forme du variogramme permet de faire la part de l'*aspect structuré* et de l'*aspect aléatoire* de la variable régionalisée. Il permet également de traiter de façon rigoureuse le problème des *erreurs de mesure* éventuelles.

Si l'on suppose encore que, dans le voisinage du point  $x_o$ , la dérive  $m(x)$  peut être approchée avec une bonne précision par la relation linéaire  $m(x) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + \dots$ , il est possible de formuler les deux conditions de non-biais et d'optimalité de l'estimateur, ce qui conduit aux équations du krigage. Leur résolution fournit les poids  $I_i$  à utiliser et permet, de plus, de calculer la variance d'estimation. Pour en savoir un peu plus, nous conseillons de débuter par la lecture des publications suivantes :

Delhomme J.-P., « Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau », Bulletin du BRGM, Section III, n° 4-1978, pp. 341-375.

Guillaume A., « Analyse des variables régionalisées », Doin Editeurs, Paris, 1977.

<sup>1</sup> Les échantillons évoqués par Matheron s'entendent au sens opératoire du terme (carottes, prélèvements), il s'agit d'individus sur lesquels seront mesurés un certain nombre de paramètres, l'ensemble de ces individus constituant un échantillon au sens statistique.

<sup>2</sup> La loi de distribution d'une variable aléatoire est dite stationnaire si elle est invariante sur le domaine étudié.

<sup>3</sup> La structure concrète la dépendance statistique entre les valeurs mesurées en deux points  $x_1$  et  $x_2$  distants de  $h$ . On peut, par exemple, la mesurer par la covariance  $C(h) = \text{Cov}(Z_1, Z_2)$ .

Alpes a momentanément été écartée pour diverses raisons :

- en montagne, les précipitations sous forme de neige représentent une part importante des précipitations totales. Leur analyse doit être distincte de celle des pluies et sort par conséquent du cadre de la présente étude ;
- nous savons, en outre, qu'à partir d'une certaine altitude, le gradient pluviométrique (augmentation de la pluie en fonction de l'altitude) change, jusqu'à quelquefois s'inverser. Il devient alors beaucoup plus difficile d'expliquer une partie de la pluviométrie par une fonction représentative de l'altitude de la station de mesure ou de ses environs ;
- la mauvaise répartition des pluviomètres dans les Alpes (souvent localisée au fond des vallées) rend les mesures rarement représentatives spatialement.

Les 66 stations retenues pour l'étude sont celles de l'Institut suisse de météorologie (fig. 1). Seules une dizaine de stations ont été écartées, leur période de mesure étant trop courte (inférieure à une dizaine d'années) pour obtenir une bonne évaluation des paramètres recherchés. La station de Macolin a été provisoirement écartée dans cette analyse, car ses données diffèrent largement de celles des autres stations et sont difficiles à interpréter (données erronées ou fortes anomalies locales?).

La période de mesure aux stations varie entre quatorze et huitante-quatre années. 54 stations ont une période de mesures supérieure à 40 ans. La densité du réseau est d'environ 1 pluviomètre par 100 km<sup>2</sup>.

### 4. L'analyse statistique des pluies journalières

L'analyse statistique précède la régionalisation proprement dite et permet de déterminer, à chaque station pluviométrique, les pluies journalières de divers temps de retour, caractéristiques des pluies journalières extrêmes.

Les études statistiques effectuées sur les séries de précipitations mesurées ponctuellement et journalièrement sont basées sur de multiples hypothèses. Le choix de la loi de distribution, la vérification des hypothèses de stationnarité, d'homogénéité ou de consistance des données, la précision des résultats sont autant de questions pour lesquelles il n'existe pas de réponse universelle. Nous nous sommes toutefois référés à l'excelente synthèse des Suisses B. Sevruk et H. Geiger [18]. Nous renvoyons à l'en-cadré les lecteurs qui s'intéressent à la démarche suivie pour le calcul des divers paramètres (gradex,  $P_T$  ( $T = 5, 10$  ou  $50$  ans)).

La confiance à attribuer aux pluies journalières de différents temps de retour

dans sa récente thèse des remarques pertinentes sur l'identification du variogramme, qui, nous le verrons, est un des points délicats de la méthode d'interpolation par le krigage.

Concernant cette méthode, le nombre de publications est à la mesure de la complexité de la théorie, mais la compréhension des principes de base n'exige pas de connaissances approfondies. Nous renvoyons le lecteur qui désirerait se familiariser avec la méthode aux travaux de Matheron [12 et 13].

Meylan [14] aborde de manière plus rigoureuse le krigage lorsque les valeurs d'une variable régionalisée sont entachées d'une erreur de détermination non

stationnaire. Cette méthode revêt une importance certaine pour la régionalisation des pluies extrêmes. En effet, après analyse des données livrées par les stations de l'Institut suisse de météorologie, on s'aperçoit que la précision de la détermination des pluies journalières extrêmes dépend fortement de la longueur de la série de mesures à la station.

### 3. Le périmètre d'étude et les stations pluviométriques retenues

La région d'étude est limitée au Plateau et au Jura de la Suisse romande. La régionalisation des précipitations dans les

CODE NOM	COORDONNÉES	SÉRIE	CODE NOM	COORDONNÉES	SÉRIE	CODE NOM	COORDONNÉES	SÉRIE
1728 MOUTIER	593380.234768.	16 ANS	5988 WITZMIL	571240.284248.	46	6378 MONT-SOLEIL	566260.223170.	77
1768 BELLELAY	579580.234808.	84	6018 LA CURE	495290.146708.	81	6408 COURTERLY	572340.225558.	68
1788 LES RANGIERS	583440.248230.	16	6038 LE SENTIER	586590.161668.	84	8828 MONTREUX CLA	5585580.143620.	84
1800 DELEMONT	593380.245228.	84	6058 VALLORBE-REP	515968.172648.	59	8848 VEVEY	554130.146248.	51
1828 LOEMENBURG	598510.253688.	16	6078 L'ABERGEMENT	527548.178778.	52	8868 TOUR-DE-GOUR	546450.151248.	45
5658 LA VALSAINTINE	588888.166588.	84	6088 VALEYRES-S-R	530320.178358.	81	8888 RIEZ	546870.149440.	48
5678 BROU-USINE	574570.162108.	15	6098 BOUCHUZ	532100.176240.	47	8100 PULLY	540820.151570.	39
5688 MARSANS	571370.167238.	84	6108 ECHALLENS	538400.165790.	51	8138 LAUSANNE	539080.153308.	84
5728 ROMONT	560200.171900.	78	6128 CORCELLES	535880.172760.	77	8180 COSSONAY	528080.162400.	83
5738 FARVAGNY G	571500.174638.	14	6138 YVERDON	539840.181450.	82	8210 MORES-TOLOC	526750.158310.	76
5748 FRIBOURG/POS	575280.197880.	82	6158 THIERRENS	547570.172610.	16	8230 MARCELIN MOR	527080.152160.	59
5768 GAUGLERA	585380.177738.	65	6168 BAULMES	530050.182458.	79	8268 LONGIROND	509350.149980.	81
5788 SCHWARZENBURG	592970.185080.	84	6198 L'AUBERSON	525650.185730.	70	8298 CHAMIGNS S.M	507300.139150.	16
5808 WAHLENDORF	592310.205940.	46	6228 ST-SULPICE	533350.195870.	84	8328 NYON	507680.137400.	77
5818 AARBERG	587620.209790.	84	6238 COUVET	538440.194550.	84	8350 JUSSY	508040.121190.	88
5838 SEMSALES	561110.150430.	16	6248 COMBE-GAROT	551100.201500.	43	8448 GENÈVE AERO	498730.122720.	84
5878 MOUDON	558820.168940.	84	6308 LA BREVINE	536740.203560.	82	8528 LE BRENETS	544470.123170.	83
5898 PAYNERE-AERO	562190.184700.	15	6328 LES PONTS M.	545640.205240.	84	8548 LE LOCLE	547260.11750.	41
5908 PAYNERE-VILL	561770.185570.	84	6338 BOUDEVILLIER	558210.208500.	16	8568 CHAUX DE F.	551060.121040.	79
5928 AVENCHES	569880.192150.	51	6348 NEUCHATEL	563150.205600.	84	8600 SAIGNELEGIER	566260.233840.	75
5948 MURTER	575520.197220.	52	6358 CHAUMONT	565820.211220.	83	8640 FAHY (AJOIE)	562450.252625.	16
5968 KERZERS	579710.204120.	16	6370 BIEL	566450.219400.	81	8670 MORMONT	569630.254220.	88

Fig. 1. — Stations pluviométriques et longueur de leur série de mesure.

déterminées à chaque station par ajustement est donnée par l'erreur type ( $\sigma_{PT}$ ) calculée pour chaque temps de retour lors de l'ajustement de la série de pluies. L'erreur type ( $\sigma_{Pl10}$ ) calculée sur la pluie décennale journalière ( $P_{10}$ ) varie, par exemple, entre 3 et 4 mm suivant la station. Par rapport à la variabilité spatiale,  $P_{10}$  variant entre 60 et 80 mm, l'erreur type est relativement importante, mais n'est pas surprenante connaissant la difficulté de mesurer avec précision les précipitations. En règle générale, l'imprécision lors de l'ajustement est de moins de 5% pour les temps de retour situés entre deux et cinquante ans.

Ces erreurs types représentent l'aspect « erreur de détermination » qui intervient directement lors de l'interpolation par krigage de la partie des précipitations non corrélées avec la morphométrie :

- des erreurs-types dépendra le calcul des erreurs d'estimation de l'interpolation sur l'ensemble du domaine étudié;
- suivant la précision des valeurs, c'est-à-dire suivant l'importance de l'erreur-type, la station aura plus ou moins de poids dans l'interpolation.

## 5. La cartographie des modules interannuels et des pluies journalières extrêmes

La méthodologie retenue consiste à traiter les précipitations, mesurées en un semis de stations irrégulièrement réparties, en deux composantes.

La première composante est uniquement fonction de la morphométrie. Celle-ci étant connue grâce au modèle digital de terrain, il est possible de calculer la valeur de cette première composante en n'importe quel point, si l'on a préalablement recherché l'équation obtenue par régression entre la pluviométrie et des paramètres représentatifs du relief.

On verra que le paramètre morphométrique (variable explicative) retenu pour cette étude est une fonction linéaire de l'altitude moyenne d'une fenêtre centrée sur la station de mesure.

On a :

$$P_T = f_T(Z) + R_T$$

avec

$P_T$  = pluie journalière de temps de retour  $T$ ;

$f_T(Z)$  = équation de la droite de régression fonction du temps de retour de la pluie;

$Z$  = paramètre(s) caractéristique(s) de la morphométrie;

$R_T$  = résidus de la régression.

Les résidus de la régression forment la deuxième composante (pouvant être due à un effet d'écran du relief, à des cheminement préférentiels des perturbations, à l'éloignement des crêtes, etc.). Ce sont des « anomalies » à la dépendance altimétrique qui ne s'expliquent que par des variations régionales. Ces résidus seront interpolés par la méthode du krigage pour obtenir les valeurs aux nœuds d'une grille régulière.

En combinant la fonction  $f_T(Z)$  aux résidus interpolés, on reconstitue les divers paramètres pluviométriques en chaque nœud.

Les courbes d'égale pluviométrie ou isovales sont finalement tracées à partir des valeurs aux nœuds de la grille par simple interpolation linéaire. Le tracé de ces lignes par ordinateur est résolu par plusieurs logiciels.

La première étape consiste donc à rechercher la fonction de la morphométrie qui explique au mieux les précipitations.

### 5.1 Influence de la morphométrie sur les précipitations

Par la recherche d'une relation entre les précipitations et la morphométrie, on essaie d'améliorer la précision spatiale de la régionalisation de la pluviométrie. En effet, vouloir interpoler sans précautions des mesures ponctuelles réalisées à des stations localisées préférentiellement dans le fond des vallées, à des points qui peuvent être d'altitude très variable en région accidentée, risque de conduire à des résultats biaisés. Une approche géographique de la régionalisation est, par conséquent, nécessaire.

Le premier paramètre auquel nous pensons pour caractériser la morphométrie est l'altitude de la station de mesure. Cependant, l'altitude du point de mesure n'est pas toujours représentative de la quantité précipitée. Lorsque le relief est passablement tourmenté, les précipitations en un lieu sont plutôt liées à l'altitude moyenne caractérisant le site où elles sont mesurées. Une vallée étroite ou un pic isolé influencent effectivement très peu le mouvement de l'air et il n'y a donc pas de raison de penser que le fond de cette vallée ou le sommet du pic reçoivent beaucoup moins ou beaucoup plus de pluies que les surfaces environnantes. Cette altitude moyenne représentative est appelée altitude lissée, car elle est obtenue après lissage de la morphométrie. Il existe dans la littérature de nombreuses méthodes permettant le calcul d'une altitude lissée [5], [17], [21]. Elles s'appuient toutes sur un modèle digital de terrain de maille inférieure ou égale au kilomètre. De notre côté, nous disposons pour notre étude d'un modèle altimétrique suisse dont la maille est égale à 250 m. Cette maille est largement assez fine pour déterminer avec précision nos paramètres.

Considérons une fenêtre altimétrique de dimension variable et centrée sur chaque station. A l'intérieur de cette fenêtre, calculons une altitude lissée selon les deux méthodes suivantes :

- le calcul simple de la moyenne arithmétique de l'altitude des nœuds à l'intérieur de la fenêtre, que nous noterons ( $Z$ ) [21];
- le choix de la valeur maximale entre la cote réelle à ce nœud et les cotes obtenues par interpolation linéaire à partir des nœuds situés à l'intérieur de la fenêtre, en se ramenant au nœud du réseau le plus proche de la station, notée ( $ZFS$ ) [5].

Remarquons tout de suite que si l'on compare altitudes des stations avec altitudes lissées ( $Z$ ) (fig. 2), il apparaît, comme nous nous en doutions déjà, qu'une majorité des stations météorologiques est située dans les dépressions. Cette situation qui fausse la répartition pourra être corrigée si l'on trouve la relation liant les précipitations à la morphométrie.

La relation entre les divers paramètres pluviométriques calculés (le module interannuel et les pluies extrêmes) et l'altitude lissée est supposée linéaire :

$$P_T = \alpha_T + \beta_T Z + R_T$$

avec :

$P_T$  = pluie journalière de temps de retour  $T$  (ou module);

$\beta_T$  = pente de la droite de régression;

$\alpha_T$  = constante;

$Z$  = altitude lissée;

$R_T$  = résidus de la régression.

L'importance de la liaison entre la pluie et l'altitude est estimée à l'aide du coefficient

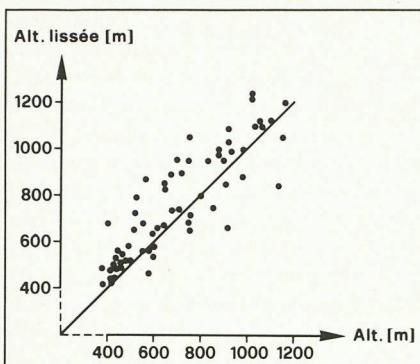


Fig. 2. — Comparaison altitude station – altitude lissée (fenêtre  $6 \times 6$  km).

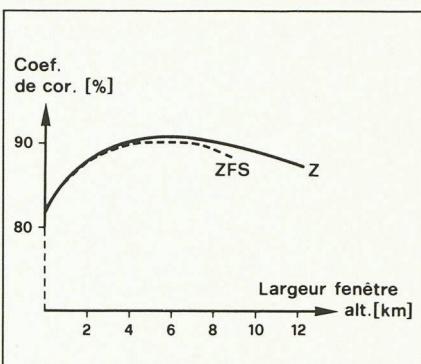


Fig. 3. — Coefficient de corrélation de la régression module – altitude par rapport à la taille de la fenêtre.

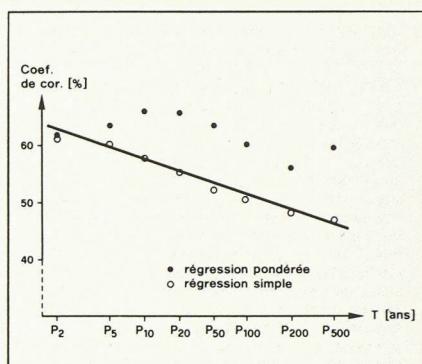


Fig. 5. — Diagramme du coefficient de corrélation de la régression  $P_T$  – altitude lissée en fonction du temps de retour (exprimé en échelle de Gumbel).

cient de corrélation de la régression linéaire.

La figure 3 donne les coefficients de corrélation pour les modules pluviométriques annuels. Le lissage altimétrique apporte une amélioration sensible de la corrélation, le maximum étant obtenu pour Z calculé sur une fenêtre carrée de 6 km de côté. Le coefficient de détermination, ou la proportion de la variance totale que l'on peut expliquer par régression linéaire, est égal à 83%.

Le diagramme du module et de l'altitude lissée Z (fig. 4) confirme que la relation peut être considérée comme linéaire dans l'intervalle altimétrique envisagé, et le gradient est égal à environ 76 mm par 100 m.

L'existence d'une relation liant les caractéristiques des pluies journalières maximales à la morphométrie est moins évidente. Nous l'avions déjà pressenti quand il est apparu que ces pluies étaient essentiellement orageuses (voir encadré). Les mouvements convectifs des masses d'air humide provoquant les orages ne sont, en effet, à priori pas liés à l'altitude du poste pluviométrique.

La régression de la pluie journalière maximale de temps de retour  $T$  avec l'altitude lissée a été calculée pour des pluies de temps de retour compris entre deux et cinq cent ans.

On s'aperçoit que le coefficient de corrélation décroît de 60% à 45% linéairement sur une échelle de Gumbel.

On serait tenté d'expliquer cette diminution du coefficient de corrélation par le fait que plus les événements sont rares, moins ils sont liés à l'orographie.

Cependant, si l'on considère que l'intervalle de confiance des précipitations journalières maximales augmente avec le temps de retour, il convient de remettre en doute cette affirmation. En effet, si l'on tient compte de la précision des  $P_T$  de différents temps de retour  $T$  en effectuant une régression pondérée en fonction de l'altitude lissée (les poids étant inversement proportionnels à l'erreur type calculée lors de l'analyse fréquentielle), on doit constater que l'on ne peut plus affirmer qu'il y a bien une décroissance du coefficient de corrélation avec le temps de retour (fig. 5). Le phénomène (décroissance du coefficient de corrélation) est donc avant tout dû à la moindre précision des valeurs  $P_T$  de temps de retour élevé.

Le coefficient de corrélation se situe aux environs de 65%, ce qui signifie qu'environ la moitié de la variance totale peut être expliquée par régression. La figure 6 donne, à titre d'exemple, la droite de régression pour les pluies journalières décennales.

Les gradients pluviométriques calculés pour différents temps de retour, c'est-à-dire les pentes des droites de régression, sont relativement constants (variant de 1,2 à 1,45 mm par 100 m).

Il n'y donc pas d'augmentation sensible du gradient avec le temps de retour. En conséquence, le gradex ne sera pas ou peu corrélé avec l'altitude.

En effet, si :

$$P_{10} = \alpha_{10}Z + \beta_{10} + R_{10}$$

$$P_{20} = \alpha_{20}Z + \beta_{20} + R_{20}$$

et si  $\alpha_{10} \approx \alpha_{20}$

alors le gradex

$$a = \Delta u / \Delta P = \Delta u / [(\beta_{10} - \beta_{20}) + (R_{10} - R_{20})]$$

avec  $\Delta u$  = différence entre les variables réduites de Gumbel pour  $T = 20$  ans et  $T = 10$  ans.

Cette hypothèse d'indépendance du gradex et de l'altitude est confirmée par un calcul de régression; le coefficient de corrélation obtenu est en effet inférieur à 30%.

A cause de cette faible explication du gradex par l'altitude, nous avons renoncé à appliquer le krigage sur le gradex. Nous cartographierons ce paramètre à partir des cartes des pluies journalières, appliquant la formule:  $a = \Delta u / \Delta P$ .

Revenant sur la régression des pluies journalières maximales, nous remarquons que la corrélation maximale est obtenue pour Z calculé sur une fenêtre de 12 sur 3 km dans la direction ouest-est. Bien que les différences soient faibles par rapport à une fenêtre carrée de 6 km de côté (augmentation du coefficient de corrélation de 2% environ), ce résultat indique une prédominance de la direction

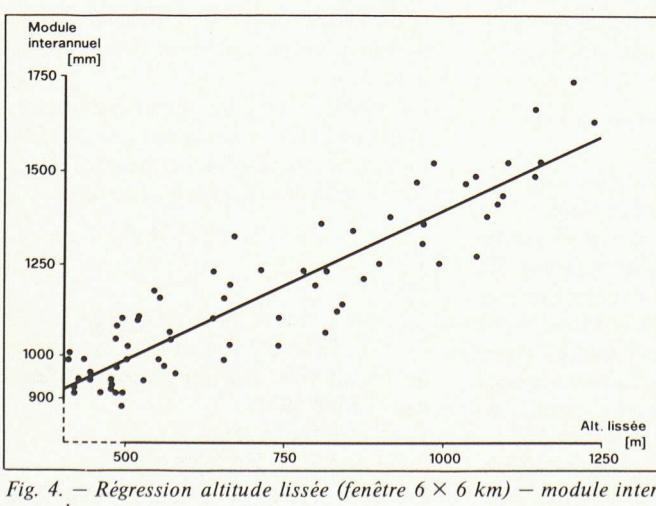


Fig. 4. — Régression altitude lissée (fenêtre  $6 \times 6$  km) – module interannuel.

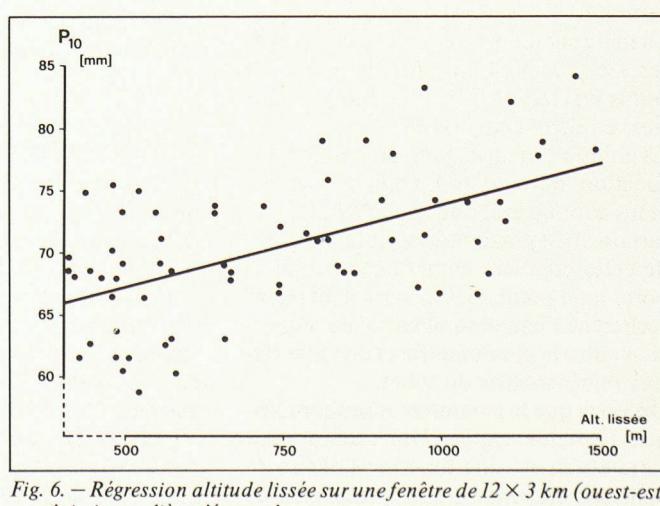


Fig. 6. — Régression altitude lissée sur une fenêtre de  $12 \times 3$  km (ouest-est) – pluie journalière décennale.

des perturbations dans le sens ouest-est. Il ne nous a pas semblé nécessaire de pousser plus loin la recherche d'un paramètre caractérisant au mieux la morphométrie par rapport à la pluviométrie. Certains auteurs [5] ont testé de nombreux autres paramètres topographiques, en faisant notamment intervenir l'orientation des versants ou l'encaissement d'un site. La recherche n'a pas été entreprise dans cette direction, car l'on n'améliore pratiquement pas la corrélation.

A ce stade de l'étude, il est possible de reconstituer, en chaque point de la grille altimétrique représentant la morphométrie de la Suisse, la partie des précipitations qui est expliquée par celle-ci. Les résidus, qui forment ce que l'on appelle parfois anomalies, ne sont plus liés à la topographie et ne s'expliquent dès lors que par des variations régionales.

### 5.2 La cartographie des résidus

Nous allons discuter de certains résultats de la cartographie, mais auparavant il nous faut présenter en quelques mots la méthode d'interpolation utilisée, le krigage.

#### 5.2.1 Présentation du krigage

Le krigage consiste à estimer une variable sur un domaine, aux noeuds d'une grille régulière, à partir d'échantillons d'implantation connue formant le semis de points. La large diffusion du krigage est avant tout due aux caractéristiques suivantes :

- le krigage est un estimateur non biaisé et optimal ;
- il permet le calcul d'une variance d'estimation (ou d'une erreur type).

Le krigage s'appuie sur la théorie des variables régionalisées. Une variable régionalisée (noté V. R.) est une fonction de l'espace, dont la valeur varie d'un lieu à un autre avec continuité, sans qu'il soit en général possible d'en représenter la variation par une loi mathématique extrapolable [12]. Cette fonction, en général irrégulière, présente deux aspects complémentaires : un aspect

structuré, rendant compte des variations régulières, et un aspect aléatoire, rendant compte des irrégularités de la fonction. La dépendance spatiale, qui est une caractéristique des V. R., est décrite par le variogramme  $\gamma(h)$ , fonction donnant la variance des accroissements entre deux points distants de  $h$  :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \int_D \left| (z(x+h) - z(x)) - \overline{(z(x+h) - z(x))^2} \right|^2 dx$$

ou  $D$  est le domaine sur lequel la V. R. est définie (ou étudiée) et  $Z(x)$  la V. R. au point  $x$ .

Le variogramme contient toute l'information structurale souhaitable concernant la variable régionalisée, c'est-à-dire :

- la dimension de la zone d'influence autour d'un point d'échantillonnage : la distance  $L$  à partir de laquelle les corrélations entre échantillons sont nulles, appelée portée, marque sur le variogramme l'apparition d'un palier ;
- la nature de la continuité de la V. R. dans l'espace est mise en évidence par le comportement du variogramme  $\gamma(h)$  au voisinage de l'origine. Normalement, pour  $h=0$ , les écarts  $z_1 - z_2 = z_1 - z_1$  sont évidemment nuls, donc  $\gamma(0) = 0$ . Mais, quelquefois, deux points très voisins présentent un écart non négligeable. Le variogramme prend alors, au voisinage immédiat de l'origine, une valeur  $c$  non nulle, que l'on appelle effet de pépite. Ce terme provient de l'étude des gisements d'or pour laquelle le krigage a été développé : la teneur en minerai varie de façon considérable selon que l'échantillon prélevé contient ou non une pépite. Cette discontinuité du variogramme peut cependant avoir d'autres origines : pour les précipitations notamment, la présence d'erreurs de mesures provoquera un effet de pépite. Si ces erreurs sont aléatoires, elles ne seront pas corrélées et la valeur du variogramme au voisinage immédiat de l'origine sera alors égale à la variance des mesures :

$$\gamma(\varepsilon) = \text{var}(z_0)$$

Le krigage recherche la meilleure estimation possible de la V. R. Z compte tenu de l'information disponible et en attribuant un poids à chaque valeur de la V. R. Ces poids sont calculés en résolvant un système d'équations (le système de krigage) basé sur un certain nombre d'hypothèses, dont nous ne parlerons pas ici, et surtout sur la connaissance du variogramme.

L'identification du variogramme est donc un des points essentiels du krigage.

#### 5.2.2 Identification du variogramme

Les variables calculées sont entachées d'une erreur de mesure non stationnaire, en raison notamment de la longueur variable des séries de mesures. La méthode classique du krigage [14] est alors modifiée comme suit :

Le variogramme brut est décomposé en un terme d'erreur qui rend compte uniquement des imprécisions dues aux mesures ou à l'échantillonnage (série statistique des pluies journalières) et en un variogramme structural.

Le variogramme structural traduit la structure du phénomène indépendamment de toutes les incertitudes de mesure.

La figure 7 présente le résultat de l'analyse structurale des résidus de la régression des pluies journalières décennales avec l'altitude. Les variogrammes bruts et structuraux y sont représentés. On constate que l'écart entre les deux graphes est sensiblement constant de l'ordre de  $12 \text{ mm}^2$ , ce qui correspond à une erreur type «moyenne» de  $3,5 \text{ mm}$ . La forme des variogrammes ne varie pas avec le temps de retour de la pluie journalière, seule la valeur de la fonction  $\gamma(h)$  augmente avec le temps de retour.

On observe que l'allure des variogrammes est relativement irrégulière, principalement pour les longues distances, mais la présence d'une structure spatiale est indéniable.

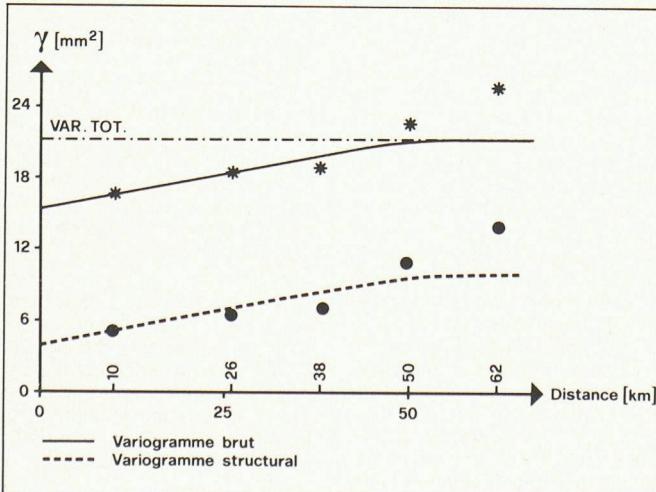


Fig. 7. — Variogramme brut et structural des résidus des pluies journalières décennales.

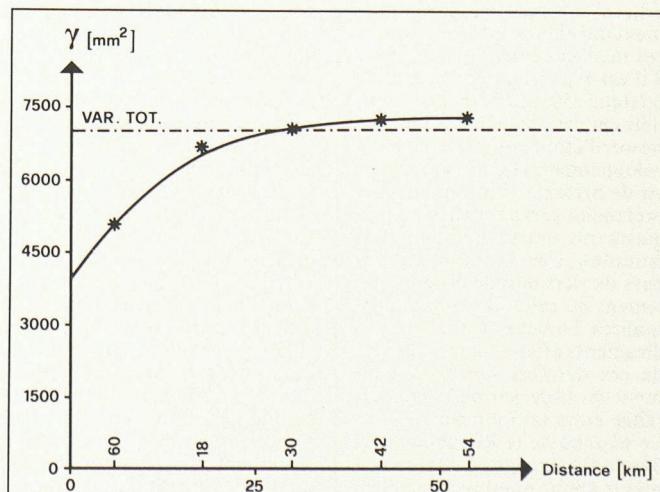


Fig. 8. — Variogramme brut des résidus des modules pluviométriques interannuels.

Nous modéliserons ces variogrammes par une forme linéaire. On remarque sur les différents variogrammes calculés que la portée, d'environ 50 km, ne dépend pas du temps de retour de la pluie journalière. Un modèle exponentiel peut convenir également, les différences de résultats après krigage sont cependant négligeables.

L'analyse de la structure des modules interannuels est effectuée sur le variogramme brut (fig. 8). Cette structure est plus nette que dans le cas des pluies journalières (variation plus régulière de la variance en fonction de l'éloignement des points). Un modèle de variogramme exponentiel est très satisfaisant.

Adresse des auteurs:  
Jean-Pierre Jordan et Paul Meylan  
Hydrologie et aménagements  
Institut de génie rural de l'EPFL  
1015 Lausanne

## Actualité

### Combien de médicaments nous sont-ils nécessaires ?

L'Office intercantonal de contrôle des médicaments (OICM) a répertorié quelque 9000 médicaments (de marques déposées). Les critiques ne cessent de prétendre que c'est beaucoup trop et que nous pourrions nous contenter de 250 remèdes. Qu'en est-il au juste?

Il y a quelques années l'Organisation mondiale de la santé (OMS) rédigeait un programme intitulé «La santé pour tous d'ici l'an 2000». Il mettait notamment en évidence la nécessité d'assurer un approvisionnement suffisant et adéquat en médicaments dans toutes les régions du monde qui souffrent encore de graves carences dans ce domaine. C'est surtout dans les pays en développement les plus pauvres, où la population n'a pas ou guère accès aux médicaments de première nécessité que l'approvisionnement doit être amélioré d'urgence.

A cette fin, l'OMS a dressé une «liste des médicaments essentiels» qui comprend environ 250 médicaments aptes à répondre aux besoins les plus criants. Il s'agit d'une liste-modèle susceptible d'aider les pays du tiers monde à constituer leurs propres listes et à déterminer les médicaments qui leur sont le plus indispensables. Dans le cadre du «programme d'action pour les médicaments» de l'OMS, l'industrie pharmaceutique offre ses services à des conditions avantageuses aux pays en développement qui cherchent à se procurer ces médicaments.

S'il est évident que cette liste de quelque 250 médicaments essentiels établie par l'OMS a toute sa raison d'être pour les pays en développement, elle ne saurait servir de prétexte pour dénoncer la prétendue surabondance de médicaments qui sévirait sous nos latitudes. Car la situation des pays du tiers monde diffère totalement de celle des pays industrialisés. Le riche éventail de médicaments offerts sur les marchés de ces derniers résulte notamment du libre jeu de la concurrence entre les fabricants.

Le marché de la République fédérale d'Allemagne compte à peu près le même nombre de médicaments (marques et variétés) que le marché suisse. Chez nos voisins allemands, toutefois, envi-

ron 2000 médicaments fournissent 93% du chiffre d'affaires des pharmaciens. Par conséquent, rien ne serait plus erroné que d'assujettir la vente des médicaments à la preuve du besoin. C'est le marché qui détermine le besoin.

Par ailleurs, l'Office fédéral allemand des assurances sociales établit la liste des médicaments remboursés par les caisses-maladie. Cette liste, dite des «spécialités», recense quelque 3000 médicaments, surtout des préparations soumises à ordonnance. Les médicaments de la liste sont «recommandés au remboursement» par les caisses-maladie. Chaque médecin choisit en fonction de cette liste le type de médicaments qu'il souhaite ordonner à son patient au titre de tel ou tel traitement.

A l'ordre du jour du Congrès mondial de la santé qui se tiendra cette année sous les auspices de l'OMS figure notamment la recommandation aux pays membres (pays industrialisés et pays en développement) d'adopter une clause du besoin. Il s'agit-là manifestement d'une mesure inutile, qui n'apporterait rien ni à l'une ni à l'autre de ces deux catégories de pays.

### Documentation «Education à l'environnement»

L'Office fédéral de l'environnement (OFPE) a chargé le Centre romand d'éducation à l'environnement du WWF d'établir, sous le titre documentation «Education à l'environnement» une récapitulation complète du matériel d'enseignement que l'on trouve en Suisse, tel que livres, films, séries de diapositives et autres.

Répartie en 17 thèmes, cette documentation s'adresse tout particulièrement aux instituteurs et aux éducateurs de tous les niveaux, depuis le jardin d'enfants jusqu'aux cours destinés aux adultes. Chacune de ces listes présente un certain nombre de livres recommandés, du matériel d'appoint pour l'enseignement et des moyens audio-visuels sur des sujets précis. Pour chaque titre, l'utilisateur trouve, en plus de données bibliographiques ou techniques, une brève description avec des renseignements sur le contenu, l'évaluation didactique et les possibilités d'utilisation. Les points de distribution et de location de ce matériel sont bien entendu aussi cités.

Le Centre romand d'éducation à l'environnement s'occupe depuis huit ans d'un service de documentation pour l'éducation à l'environnement. La documentation «Education à l'environnement», qui se fonde sur l'expérience et le fichier du centre, est accessible à un large cercle d'utilisateurs. Il existe déjà des listes concernant les sujets suivants: «Forêt», «Energie» et «Protection des biotopes». Au cours des prochains mois s'ajouteront les sujets «Ressources, déchets, recyclage», «Eau» et «Sols».

La constitution de cette documentation devrait être terminée dans le courant de l'année 1987; elle sera mise à jour périodiquement.

La documentation «Education à l'environnement» est mise gratuitement à disposition. Elle peut être commandée — avec mention du titre désiré et en joignant une enveloppe affranchie C5 — à l'Office fédéral de la protection de l'environnement, service de documentation, 3003 Berne.

### Vers une ingérence de l'Etat dans le domaine du jardinage ?

Des dizaines de milliers de propriétaires ou locataires de jardins attendent le printemps avec impatience. Tous se réjouissent intensément de l'apparition des premiers rayons de soleil qui vont réveiller la terre et leur permettre ainsi de s'adonner à des travaux aussi délassants que vivifiants. La nature soutiendra généralement leurs efforts assidus tout au long de l'été, pour les récompenser en fin de saison par d'abondantes récoltes.

Mais à tous ces amis du jardin, de même qu'aux amateurs de belles pelouses, l'Office fédéral de la protection de l'environnement réserve une surprise de taille. Si le gouvernement accepte ses propositions, les propriétaires de jardin auraient en effet du jour au lendemain le privilège unique au monde, bien que fort douteux, d'être obligés de choisir entre le mal de dos ou l'envahissement de leurs plates-bandes par les mauvaises herbes. Car ledit office envisage rien moins que d'interdire purement et simplement, dans le cadre de l'ordonnance sur les substances toxiques, l'utilisation d'herbicides dans les jardins. De même, aucun engras contenant des herbicides ne serait plus autorisé dans les soins apportés aux pelouses et gazon. Ainsi des produits qui demeuraient na-

turellement admis pour les agriculteurs seraient-ils prohibés pour les amateurs de jardinage ? Curieuse conception de l'équité. Les produits modernes utilisés pour détruire les mauvaises herbes sont conçus de façon à pouvoir se dégrader rapidement dans le sol. Appliqués avec mesure et discernement, ils ne représentent pas le moindre danger pour l'environnement. Ne ferait-on subtilement plus aucune confiance en la capacité des citoyens-jardiniers à manier correctement ces précieux auxiliaires ? D'autre part, qui serait chargé de veiller au respect de cette mesure totalement irréaliste ? Les voisins ? Le policier de l'arrondissement ? Et désormais, aux frontières, les fonctionnaires des douanes seraient-ils également chargés de débusquer dans les bagages des voyageurs, en plus des bouteilles d'alcool excédentaires et autres marchandises surveillées, les produits phytosanitaires achetés à l'étranger ?

On ne cesse de souligner, du côté des autorités, que les prescriptions légales doivent s'inspirer du principe de la proportionnalité. L'interdiction qui, dans le cadre de l'ordonnance sur les substances, s'appliquerait aux herbicides utilisés dans les jardins privés ou particuliers, c'est-à-dire, en fin de compte, à une quantité relativement faible de ce type de produit, serait une démonstration patente du non-respect de la proportionnalité. Espérons que le Conseil fédéral saura garder le sens de la mesure.

## Bibliographie

### Proceedings — Xth IUPAC Symposium

#### Textes du X<sup>e</sup> Symposium sur la photochimie

Un volume 15 × 21 cm, 620 pages, nombreuses références bibliographiques et chiffres. Editions Presses polytechniques romandes, 1015 Lausanne, 1984. Prix: Fr. 75.—.

Ce livre est destiné à tous ceux qui font de la recherche et qui n'ont pas eu la possibilité de participer à ce symposium<sup>1</sup>. Ils auront ainsi une vue d'ensemble des progrès de la recherche dans les différents champs de spécialisation de la photochimie.

<sup>1</sup> CCC Interlaken, du 22 au 27 juillet 1984.