

Modélisation hydrologique globale conceptuelle appliquée aux petits bassins versants en zone semi-aride du Nord Mexique

Lumped conceptual hydrologic model applied to small catchments in the semi-arid area of the North Mexico

J. ESTRADA AVALOS¹, J.-M. LAMACHÈRE*², J.-P. THIÉBAUX³

Reçu le 19 septembre 2002, accepté le 2 juillet 2003**.

SUMMARY

In a co-operative programme between CENID RASPA (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta y Atmosfera, México) and IRD (formerly ORSTOM, France), seven small dams were equipped for hydrological measurements in an extensive breeding system, the ranch Atotonilco, located in a semi-arid area of northern Mexico. The main aim of the equipment was to follow the surface water in the water supply system of the ranch (ESTRADA AVALOS, 1999). In order to analyse the role of the seven small dams, it was necessary to understand the hydrological conditions of their filling and emptying. Also, manual and automatic rain gauges were installed on small experimental watersheds (0.15 to 5 km²) and on the ranch (450 km²), and in addition evaporation pans and a floating pan were placed on the banks of a few dams and in a reservoir (THIEBAUX, 2000).

The aim of this paper is to present the overall conceptual hydrological model used to calculate runoff in the small catchments in the Atotonilco ranch, considering that it was necessary to utilise the rainfall intensities to explain the surface runoff. Hydrological observations were made from 1996 to 1998 on the Atotonilco ranch. Spatial analysis of the rainfall demonstrated the existence of several types of storms: those with a small extension (17 km²), with a middle extension (160 km²) or with a great extension (more than 450 km²). The average distance between two isohyets with a deviation of 10 mm varied from 2 to 3 km. In this semi-arid area, obtaining rainfall measurements of good precision requires a dense rain gauge network. On the small catchment scale it was necessary to put three or four rain gauges in each river basin.

On the scale of small catchments, the analysis of the relationship between the amount of rainfall and surface runoff showed that rainfall intensity explai-

1. CENID RASPA, Apdo. Postal 41, Gómez Palacio, Dgo. Mexico.

2. Mission IRD, BP 434, 1004 El Menzah 4 Tunis, Tunisie (lamachere@ird.intl.tn, tel (216) 71 750 009).

3. « le Creytel », F-38114 Allemont, France.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 2004.

ned very clearly the surface runoff. This led us to the construction of a lumped model using the following criteria:

- rainfall intensity limit of surface runoff (IL), with a time step of 30 min,
- forward rainfall index (IK),
- useful rainfall (PUIL), sum of the depths of rainfall with intensities higher than the limit value of IL.

Experimental measures without runoff and with surface runoff have been used to describe the variation of the rainfall intensity limit of the surface runoff (IL), which decreases exponentially with increasing forward rainfall index (IK). This index IK is defined as the sum of the previous rainfall and the previous index, which decreases in an exponential manner with the time interval Δt expressed in days (and partial days) between two successive showers (LINSLEY *et al.*, 1949).

The interval dt , which defines the rainfall intensity, depends on the time of concentration in the small catchments. On the Atotonilco ranch, the correlations between rainfall intensities for different intervals and surface runoff demonstrated that a 30-min interval provided the best results. However, we did not obtain significant correlations between surface runoff and different values of the exponential decreasing coefficient of IL as a function of IK (α). Considering the results obtained by ESTRADA AVALOS (1999) on the scale of experimental plots (60 m²), we have chosen the value $\alpha = 0.1 \text{ day}^{-1}$. This value increases IK during the rainy season when increasing soil moisture and grass cover growth, but these two factors have opposite effects on the surface runoff.

Two parameters define the quadratic relationships between the useful depth of rainfall and the surface runoff: the parabolic increasing coefficient (E) and the position coefficient (F). It is possible to determine the position coefficient F with the value of the useful rainfall (PUIL₀) which gives a null value to the depth of surface runoff.

Using the observations collected from 1996-1998, we demonstrated that the position coefficient F decreased linearly with an increasing forward rainfall index IK. In addition, the parabolic increasing coefficient E was constant in the same basin, except when the storms were spaced less than 24 h apart and when the grass cover was low at the beginning of the rainfall season (1996). In these two cases, the runoff aptitude of the watersheds was clearly greater resulting in a higher E coefficient, which was sometimes too high for a parabolic relationship. It would be better to extrapolate above the limit value of PUIL taking into consideration that the additional runoff is equal to the additional useful rainfall.

In order to validate the calibration of this model we used the criterion of NASH and SUTCLIFFE (1970). This criterion was calculated only for the year of 1996 but for two scenarios: the first scenario considered the parameter F as a constant and the second scenario allowed for a linear decrease of this parameter with the forward rainfall index IK. The results demonstrated that it was always better to use, for the position parameter F, a linearly decreasing relationship with the index IK.

The relationships defined for the seven experimental catchments in the Atotonilco ranch were used to calculate long daily chronic inflows into the little dams (ESTRADA AVALOS, 1999). The hydrological parameters were also mixed with the natural characteristics of the small catchments in order to perform a principal components analysis of the relationships between hydrological parameters and natural criteria. Rules for the transposition of the parameters of this quadratic model on the Atotonilco ranch were established using the results of the analysis.

Key words: hydrology, lumped conceptual model, small watersheds, northern Mexico, semi-arid area, Atotonilco ranch.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une collaboration entre le CENID-RASPA (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta y Atmosfera, México) et l'IRD (anciennement ORSTOM, France), sept petites retenues du ranch Atotonilco, ranch d'élevage extensif situé au Nord-Mexique dans une zone semi-aride montagneuse, ont été équipées pour l'enregistrement en continu des niveaux d'eau (1996-1998). Des pluviomètres et pluviographes ont été installés sur leurs bassins versants (0,15 à 4,10 km²) et répartis sur toute la surface du ranch (450 km²). Par ailleurs, une soixantaine de petits barrages équipent ce ranch. En période pluvieuse ils complètent l'alimentation en eau du bétail, assurée principalement par des forages. L'objectif général de l'étude menée par le CENID-RASPA est d'analyser quel est et quel pourrait être le rôle de ces petits barrages dans l'alimentation en eau du ranch.

À l'échelle des bassins versants, l'analyse des relations entre la hauteur de pluie et la lame ruisselée montre que la prise en compte de l'intensité de pluie est nécessaire pour expliquer le ruissellement. Dans ce but, un modèle hydrologique global conceptuel a été défini utilisant les notions :

- d'intensité de pluie limite du ruissellement (IL),
- d'indice des pluies antérieures (IK)
- de pluie utile (PUIL), somme des pluies dont l'intensité, pour une même averse, dépasse la valeur limite IL.

Les averses sans ruissellement et avec un faible ruissellement servent à définir la relation entre IL et IK. Deux paramètres définissent les relations hydro-pluviométriques : le coefficient de croissance parabolique E et le paramètre de position F, associé à l'origine des ruissellements. Le paramètre de position F varie en fonction de l'indice des pluies antérieures et tend à s'annuler pour une forte valeur de IK. Le paramètre E varie peu pour un même bassin, sauf lorsque deux averses sont espacées de moins de 24 heures et lorsque le couvert végétal herbeux est très dégradé. Dans ces deux cas, le coefficient E est nettement plus élevé, parfois trop élevé pour l'utilisation d'une relation parabolique.

Les relations ainsi définies ont été utilisées pour calculer de longues séries d'apports journaliers dans les petits barrages du ranch Atotonilco (ESTRADA AVALOS, 1999).

Mots clés : hydrologie, modélisation globale conceptuelle, petits bassins versants, Nord-Mexique, zone semi-aride, ranch Atotonilco.

1 - INTRODUCTION

Dans la zone semi-aride du Nord-Mexique, de 1995 à 1998, les travaux hydrologiques du CENID-RASPA (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta y Atmosfera, México) ont été menés en collaboration avec l'IRD (anciennement ORSTOM, France) dans le ranch Atotonilco, voué à l'élevage extensif sur une superficie de 450 km². Ce ranch est situé dans la partie centrale du Nord-Mexique, à égale distance entre les Sierras Madre occidentale

et orientale, dans une zone montagneuse de l'Etat de Durango. Les observations hydrologiques effectuées de 1996 à 1998 (THIEBAUX, 2000) à l'échelle de petits bassins versants (0,15 à 5 km²) ont combiné :

- la mesure des hauteurs de pluie et des intensités pluviométriques,
- la mesure des volumes ruisselés par l'enregistrement des niveaux d'eau de sept petites retenues,
- l'étalonnage des déversoirs,
- et la mesure des volumes emmagasinés par topographie pour établir les relations entre les niveaux d'eau et les volumes stockés dans ces sept retenues.

Les observations physiographiques ont porté sur le relief, la géologie, la pédologie et la végétation de tout le ranch Atotonilco, plus particulièrement des sept bassins versants équipés pour l'observation des pluies et des débits.

L'objectif général du projet est l'analyse de la gestion des eaux superficielles et souterraines à l'échelle du ranch Atotonilco (ESTRADA AVALOS, 1999). L'objectif spécifique concernant les petits barrages est l'estimation des volumes ruisselés sur leurs bassins versants afin d'évaluer les ressources en eaux superficielles disponibles à l'échelle du ranch. En raison de l'extrême variabilité de la forme des hyétogrammes dans cette région semi-aride, l'utilisation des intensités de pluie dans la modélisation du ruissellement est apparue nécessaire afin d'améliorer la qualité des relations hydro-pluviométriques.

Plutôt que d'utiliser des modèles hydrologiques à bases physiques, lourds à mettre en œuvre, tels que KINEROS (WOOLHISER *et al.*, 1989), r.water.fea (VIEUX et GAUER, 1994) ou « abc » (CAPPELAERE *et al.*, in MANSOUR, 2000), aptes à l'analyse spatiale du fonctionnement d'un bassin-versant mais peu faits pour générer de longues séries d'apports journaliers, nous avons cherché à définir un modèle hydrologique global conceptuel, intégrant les intensités pluviométriques dans le calcul des lames ruisselées. À cette fin, nous utiliserons les notions d'intensités de pluie limite du ruissellement et de pluie utile, employées depuis longtemps à l'échelle du mètre carré (CASENAVE 1982 ; ALBERGEL 1988 ; CASENAVE et VALENTIN 1989), mais encore peu utilisées à l'échelle du bassin versant.

2 - OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES

2.1 Observations

De 1996 à 1998, le ranch Atotonilco a été équipé d'un réseau de 32 pluviomètres totalisateurs, 5 pluviomètres standards et 9 pluviographes (figure 1). Les pluviographes furent placés en priorité sur chacun des 7 petits bassins versants expérimentaux où ils restèrent associés à un pluviomètre standard et à un ou deux pluviomètres totalisateurs.

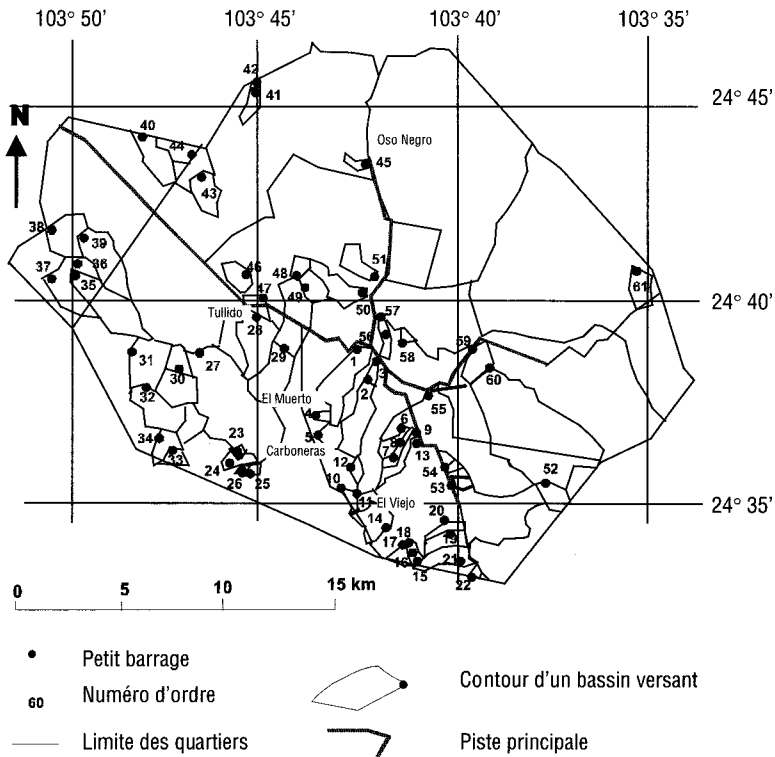


Figure 1 L'équipement hydrologique du ranch Atotonilco.
The hydrological equipment in the Atotonilco ranch.

L'analyse spatiale des précipitations journalières dans le ranch Atotonilco, après interpolation entre les hauteurs d'eau observées aux stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du ranch pour le dessin des isohyètes, a montré l'existence de plusieurs types d'événements pluvieux : des événements de faible extension spatiale (17 km^2), d'extension moyenne (160 km^2) et de grande extension (plus de 450 km^2). Pour la plupart des événements, deux courbes isohyètes voisines sont distantes d'environ 1 km lorsque l'écart pluviométrique est de 5 mm. Lorsque cette différence entre hauteurs pluviométriques est de 10 mm, la distance moyenne entre les courbes reste comprise entre 2 et 3 km. Dans cette région semi-aride du Nord-Mexique, une connaissance précise de la pluviométrie à l'échelle des bassins versants impose donc un réseau dense de pluviomètres. Pour un bassin dont la superficie est de 100 km^2 , afin de limiter l'écart pluviométrique observé entre pluviomètres voisins au-dessous de la valeur 10 mm, le réseau pluviométrique doit se composer de 15 à 20 pluviomètres régulièrement répartis sur toute la surface du bassin. Pour un petit bassin versant, de superficie inférieure à 5 km^2 , un seul pluviomètre ne suffit pas à connaître avec précision la pluie tombée sur le bassin et il faut pour ce faire, en plus du pluviomètre placé au centre du bassin, entourer ce bassin de 4 pluviomètres régulièrement espacés.

Sept retenues du ranch Atotonilco ont été équipées d'échelles limnimétriques et de limnigraphes pour l'enregistrement en continu des niveaux d'eau. Ces retenues ont été choisies de manière à ce que leurs bassins versants fussent placés sur les différentes formations géologiques présentes dans le ranch, les différents types de sols et les principales formations végétales.

Des relevés topographiques précis des retenues (maille de 5×5 m), rattachés aux échelles limnimétriques, ont permis, chaque année, d'établir des plans topographiques avec des écarts de 20 cm entre courbes de niveau. Au cours de l'année 1996, année normalement pluvieuse, l'envasement annuel est resté compris entre 100 et 250 m^3 pour la plupart des retenues, ce qui correspond à des taux annuels d'envasement compris entre 0,4 et 6 %, soit une érosion spécifique des bassins versants comprise entre 0,4 et $1,4 \text{ m}^3$ par hectare. Négligeable et inférieur à 1 % pour les retenues El Muerto, El Molino et Oso Negro, le taux d'envasement présente une importance certaine pour les retenues El Viejo, Tullido et Carboneras où il atteint 4 à 6 % de leur capacité de stockage pour l'année 1996. Le ranch Atotonilco est cependant équipé d'un bulldozer qui permet au personnel du ranch d'évacuer les sédiments stockés dans les retenues lorsque ceux-ci commencent à limiter sérieusement les capacités de stockage des petits barrages.

Pendant les phases de déversement, des jaugeages au moulinet ont été effectués au niveau des déversoirs. Des déversements ayant été observés pour trois retenues sur sept (El Tullido, Carboneras et El Viejo), des courbes de tarage des déversoirs ont été établies pour chacune de ces trois retenues.

2.2 Résultats

À l'échelle journalière, la figure 2 présente la relation générale obtenue sur le bassin versant El Viejo, relation sensiblement identique à celles que l'on peut obtenir pour les autres bassins versants. L'allure générale de cette relation entre la lame ruisselée (L_r) et la pluie journalière (P_j) est de forme parabolique.

Le tableau 1 présente les relations obtenues pour l'ensemble des bassins versants, à l'exception de deux bassins : Oso Negro sur conglomérat basaltique et El Molino sur basalte, qui ruissellent très peu et pour lesquels deux à trois faibles crues ont été observées sur la période 1996-1998. Comme critère d'ajustement de ces relations, nous avons utilisé la somme des écarts quadratiques entre la lame ruisselée calculée (L_c) et la lame ruisselée observée (L_o). Les valeurs de ce critère figurant sur le tableau 1 sont les valeurs minimales obtenues et elles sont associées aux valeurs des paramètres A et B de la relation $L_r = A(P_j - B)^2$.

Cependant, pour la plupart des bassins versants, des averses dont le total pluviométrique journalier est élevé peuvent ne produire que de faibles ruissellements, telle l'averse du 3 octobre 1996 sur le bassin El Viejo qui totalise 69,1 mm, mais avec une intensité maximale faible, de seulement 7 mm/h en 30 mn. Il semble donc nécessaire d'utiliser, sur les bassins versants de cette zone semi-aride du Nord-Mexique, l'intensité de pluie comme facteur principal explicatif du ruissellement.

À l'échelle annuelle, le tableau 2 synthétise l'essentiel des observations.

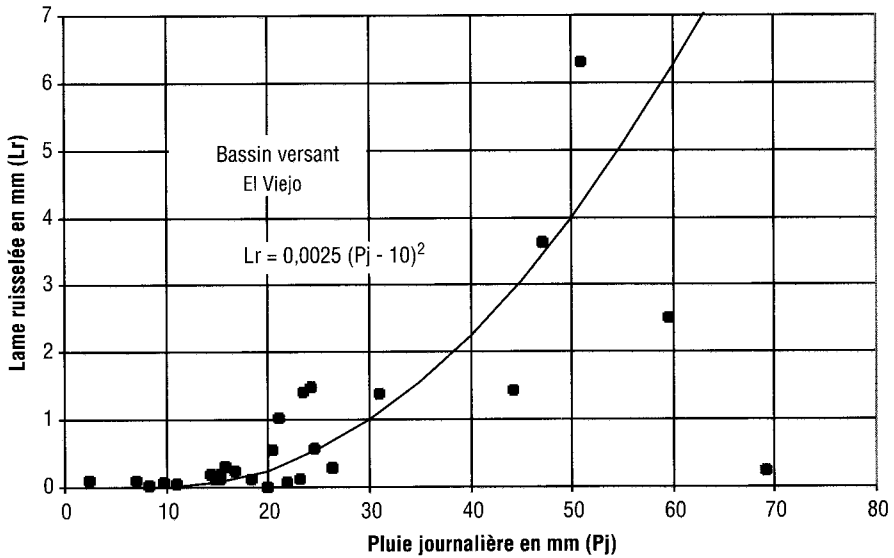


Figure 2 Pluies journalières et lames ruisselées sur le bassin versant El Viejo.
Daily depths of rainfall and runoff on the catchment of El Viejo.

Tableau 1 Relations entre la lame ruisselée (Lr) et la pluie journalière (Pj) sur les bassins versants expérimentaux du ranch Atotonilco.

Table 1 *Relations between daily runoff (Lr) and daily depths of rainfall (Pj) on the experimental catchments in the Atotonilco ranch.*

Bassins versants	Superficies en km ²	Relations paraboliques	Critère d'ajustement (Lc - Lob) ²
El Viejo	1,76	$Lr = 0,0025 (P - 10)^2$	95,4
Carboneras	1,06	$Lr = 0,0036 (P - 10)^2$	31,4
El Muerto	0,15	$Lr = 0,0025 (P)^2$	66,7
Pastelero	1,68	$Lr = 0,0036 (P - 5)^2$	8,9
El Tullido	4,10	$Lr = 0,0025 (P - 5)^2$	35,2

Tableau 2 Précipitations et ruissellements annuels observés sur les bassins versants expérimentaux du ranch Atotonilco.

Table 2 *Observations of annual depths of rainfall and annual runoff on the experimental catchments in the ranch Atotonilco.*

Bassins versants	Superficies en km ²	Lames précipitées			Coefficients d'écoulement		
		en mm	1997	1998	1996	1997	1998
Années		1996	1997	1998	1996	1997	1998
El Viejo	1,76	543	435	384	2,1	0,5	2,5
Carboneras	1,06	470	410	316	3,4	0,4	1,8
El Muerto	0,15	451	357	295	3,5	1,4	3,4
Pastelero	1,68	477	376	315	2,7	0,3	2,2
El Tullido	4,10	468	372	313	2,3	0,7	1,6
El Molino	0,15	389	383	223	0,5	0,0	0,0
Oso Negro	0,27	356	513	254	0,0	0,4	0,0

À l'échelle annuelle, l'analyse des résultats montre que :

- le bassin ayant montré la plus forte aptitude au ruissellement est celui d'El Muerto, sur matériaux calcaires et colluvions (3,5 % en 1996),
- à l'opposé, les bassins versants sur basaltes et sur conglomérats basaltiques (El Molino et Oso Negro) ruissellent très rarement, une année sur 2 ou 3 (0,5 à 0,4 %),
- les bassins versants sur rhyolite (El Viejo) et sur colluvions et alluvions (Pastelero) ont des coefficients de ruissellement très proches (2,1 à 2,7 % en 1996 et 1998 ; 0,3 à 0,5 % en 1997),
- les bassins sur rhyolite et calcaire (Carboneras), sur rhyolite et colluvions (El Tullido) ont des coefficients de ruissellement qui varient de la même manière d'une année à l'autre (de 0,4 % en 1997 à 3,4 % en 1996).

3 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE

Pour la prise en compte de l'intensité des pluies dans les relations entre la pluie et la lame ruisselée à l'échelle de l'averse, nous avons défini une valeur seuil appelée intensité de pluie limite du ruissellement (IL). Ce seuil sert au calcul de la pluie utile (PUIL), variable pluviométrique représentant la quantité de pluie susceptible de ruisseler. C'est cette variable pluviométrique que nous utiliserons pour expliquer les lames ruisselées. Cependant, le concept de pluie limite du ruissellement utilise l'indice d'antériorité des pluies (IK) comme facteur explicatif de ses variations.

3.1 L'indice d'antériorité des pluies

L'indice d'antériorité des pluies (LINSLEY *et al.*, 1949) est de la forme :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot \Delta t) \quad (1)$$

où IK_n est la valeur de l'indice au début de l'averse n , IK étant exprimé en mm,

P_{n-1} est la hauteur d'eau correspondant à l'averse $n-1$, dernière pluie avant l'averse n , elle est exprimée en mm,

Δt est l'intervalle de temps entre la fin de l'averse $n-1$ et le début de l'averse n , il est exprimé en jours,

α est un coefficient qui règle la décroissance exponentielle de l'indice IK en fonction du temps, il est exprimé en jours⁻¹.

L'indice IK est défini par un seul paramètre (ici $\alpha = 0,1 \text{ jour}^{-1}$) considéré généralement comme une constante caractéristique d'un type de sol. L'indice IK est constant au cours d'une même averse. Il décroît dès la fin de l'averse jusqu'au début de l'averse suivante et sa vitesse de décroissance dépend directement de la valeur du paramètre α . Pour des sols sableux à sablo-limoneux, la valeur $\alpha = 0,5$ à $0,6 \text{ jour}^{-1}$ est conseillée en Afrique sahélienne (SEGUIS, 1986 ; CASENAVE et VALENTIN, 1989). Dans le ranch Atotonilco, les résultats obtenus à l'échelle des parcelles expérimentales (50 à 60 m^2), installées sur les bassins El Viejo et Carboneras, ont montré que la valeur $\alpha = 0,1 \text{ jour}^{-1}$ correspondait aux meilleures corrélations entre l'indice IK et la lame ruisselée (ESTRADA AVALOS, 1999).

3.2 L'intensité de pluie limite du ruissellement

L'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) est définie comme l'intensité de pluie au-dessous de laquelle on n'observe aucun ruissellement. Définie à l'échelle élémentaire par CASENAVE (1982) et ALBERGEL (1988) pour l'interprétation des données de simulation de pluie, nous avons étendu ce concept à l'échelle de petits bassins versants. Pour déterminer cette variable à cette échelle, nous nous sommes intéressés à la fois aux événements pluvieux n'ayant pas ruisselé et aux événements pluvieux ayant produit un ruissellement. Sur un même graphique (figure 3), nous avons reporté les intensités pluviométriques maximales de chaque événement pluvieux au pas de temps de 30 mn en fonction des valeurs de l'indice des pluies antérieures (IK) indiquant l'état d'humectation des sols du bassin avant l'averse.

En distinguant les événements qui ruissellent de ceux qui ne ruissellent pas (figure 3), on trace une courbe limite entre ces deux types d'événements. Cette courbe limite définit l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) sur le pas de temps considéré, ici 30 mn, en fonction de l'indice d'antériorité des pluies (IK). La décroissance de IL en fonction de IK est exponentielle et IL prend la forme mathématique suivante :

$$IL = IL_0 \cdot e^{-\beta \cdot IK} \quad (2)$$

où IL_0 est l'intensité de pluie limite du ruissellement en début de saison des pluies, pour $IK = 0$, exprimé en $mm \cdot h^{-1}$,
 β est le coefficient de décroissance exponentielle, exprimé en mm^{-1} .
 Deux paramètres définissent donc les variations de IL en fonction de IK : IL_0 et β .

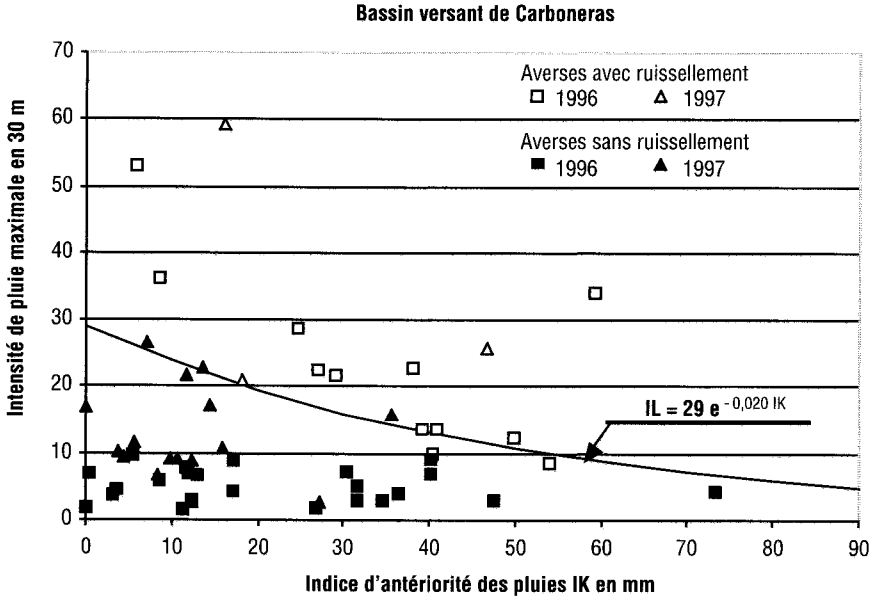


Figure 3 Détermination de l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) sur le bassin versant de Carboneras (ESTRADA AVALOS, 1999).
Determination of the rainfall intensity limit of runoff (IL) on the catchment of Carboneras (ESTRADA AVALOS, 1999).

Tableau 3 Valeurs de l'intensité de pluie limite du ruissellement pour un sol sec (IL_0) et du coefficient de décroissance exponentielle (β) de IL en fonction de IK .
Table 3 Values of the rainfall intensity limit of the runoff for a dry soil (IL_0) and values of the exponential decreasing coefficient (β) of IL in ratio to IK .

Bassins versants	El Viejo	Carboneras El Molino	El Muerto	Pastelero	El Tullido	Oso Negro
IL_0 en mm/h	25	29	24	30	22	(45)
β en mm^{-1}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,014	0,02

(45) valeur minimale de IL_0 pour le bassin-versant Oso Negro en raison de l'absence d'écoulement observé.

Pour utiliser le concept d'intensité de pluie limite du ruissellement (IL), deux paramètres doivent donc être déterminés : le pas de temps de l'intensité de pluie (dt) et le coefficient de décroissance exponentielle de l'indice IK (α). Le premier est en rapport avec le temps de réponse du bassin et le second avec la dépendance d'une crue par rapport à l'averse qui la précède.

Des corrélations linéaires simples entre les racines carrées des lames ruisselées (\sqrt{Lr}) et différents pas de temps dt (tableau 4) ont montré que, pour la plupart des bassins versants étudiés, le pas de temps de 30 minutes fournissait le meilleur coefficient de corrélation, avec des valeurs du coefficient de corrélation presque toujours supérieures à 0,8.

Tableau 4 Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées (\sqrt{Lr}) sur les bassins versants et différentes durées (dt) d'intensités maximales de pluie.

Table 4 Values of correlation coefficients between quadratic roots of the runoff (\sqrt{Lr}) on the catchments and several intervals (dt) of highest rainfall intensities.

Pas de temps dt	5 mn	10 mn	15 mn	30 mn	45 mn	60 mn	90 mn
El Viejo	0,82	0,89	0,92	0,93	0,92	0,91	0,91
Carboneras	0,72	0,80	0,82	0,83	0,81	0,80	0,82
El Muerto	0,80	0,89	0,90	0,91	0,95	0,95	0,91
Pastelero	0,06	0,08	0,28	0,89	0,52	0,53	0,55
El Tullido	0,46	0,62	0,72	0,62	0,56	0,56	0,54

Par contre, quelle que soit la valeur de α , à l'échelle des bassins versants les coefficients de corrélation entre les lames ruisselées et les valeurs de l'indice IK restent faibles et peu significatifs. La valeur $\alpha = 0,1 \text{ jour}^{-1}$ a donc été choisie arbitrairement en référence aux résultats obtenus à l'échelle des parcelles expérimentales. La conséquence du choix d'une valeur faible de α est de limiter la décroissance de l'indice IK en fonction du temps et de faire croître cet indice au fil de la saison des pluies. On peut donc penser que l'indice IK, avec la valeur α égale à $0,1 \text{ jours}^{-1}$, joue ici un double rôle : rendre compte à la fois de l'humectation du sol et du développement du couvert végétal au cours de la saison des pluies, les deux rôles ayant des effets antagonistes sur le ruissellement.

3.3 La pluie utile

La notion de pluie utile (PUIL) découle directement de la notion d'intensité de pluie limite du ruissellement (IL). C'est le total pluviométrique de l'averse lorsqu'on ne prend en compte que les intensités de pluie qui dépassent le seuil correspondant à IL. La formulation mathématique de la pluie utile est la suivante :

$$PUIL_n = \sum (IP_i^n \cdot dt_i^n) \text{ pour } IP_i^n \geq IL^n \quad (3)$$

où IP^n est l'intensité de l'averse n durant l'intervalle de temps dt^n ,
 i est un numéro d'ordre du pas de temps dt au cours de l'averse,
 IL^n est l'intensité de pluie limite du ruissellement au début de l'averse n ,
 IL^n étant considérée comme une constante pendant toute l'averse.

Connaissant l'intensité de pluie limite du ruissellement au début de l'averse n (IL^n), la pluie utile est calculée en transformant le hyétogramme observé, à pas de temps variables, en hyétogramme à pas de temps constant correspondant au pas de temps dt ayant servi à la définition de IL . Pour les petits bassins versants du ranch Atotonilco, les hyétogrammes des averses doivent donc être définis au pas de temps $dt = 30$ mn.

Pour justifier l'utilisation de la notion de pluie utile dans les relations hydro-pluviométriques dans le ranch Atotonilco, nous avons calculé les coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées, la pluie moyenne à l'échelle des bassins et la pluie utile calculée pour différentes intensités de pluie limites de ruissellement. Les résultats des calculs sont reportés sur le tableau 5.

Tableau 5 Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées (\sqrt{Lr}) sur les bassins versants, les pluies journalières (P_j) et les pluies utiles (PUIL).

Table 5 Values of correlation coefficients between quadratic roots of the runoff (\sqrt{Lr}) on the catchments, daily depths of rainfall (P_j) and useful depths of rainfall (PUIL).

Bassins versants	El Viejo	Carboneras	El Muerto	Pastelero	El Tullido
P_j en mm	0,86	0,69	0,69	0,73	0,52
PUIL en mm	0,92	0,89	0,89	0,83	0,63

3.4 Relations entre la pluie utile et la lame ruisselée

Pour tenir compte de la forme parabolique des relations entre la lame ruisselée et la hauteur pluviométrique de l'averse, ESTRADA AVALOS (1999) a proposé la forme générale suivante pour définir les relations hydro-pluviométriques :

$$Lr = (E \cdot PUIL - F)^2 \quad (4)$$

En y ajoutant la restriction que la pente de cette relation soit inférieure à 1, il vient :

$$\frac{dLr}{dPUIL} \leq 1 \quad \text{soit} \quad PUIL \leq \frac{F}{E} + \frac{1}{2 \cdot E^2} \quad (5)$$

Dans la relation ainsi définie, E est le coefficient de croissance quadratique et F la racine carrée de la lame ruisselée pour une valeur nulle de PUIL ($PUIL = 0$; $F = \sqrt{Lr_0}$).

4 – CALAGE ET VALIDATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

Des 3 années d’observations hydrologiques effectuées dans le ranch Atotonilco, l’année 1996 apparaît comme la plus riche en averses génératrices de ruissellements et l’année 1997 comme la plus sèche. Ainsi, sur le bassin versant El Viejo, un de ceux qui ruissellent le plus, nous avons observé respectivement :

- 15 crues en 1996
- 3 crues en 1997
- 7 crues en 1998

Les crues sont ici définies comme des montées du plan d’eau des petites retenues correspondant à des lames ruisselées supérieures ou égales à 0,1 mm. Nous avons utilisé les données de l’année 1996 pour caler notre modèle hydrologique et celles des années 1997 et 1998 pour sa validation.

La figure 4 présente les relations hydro-pluviométriques du bassin versant de El Viejo.

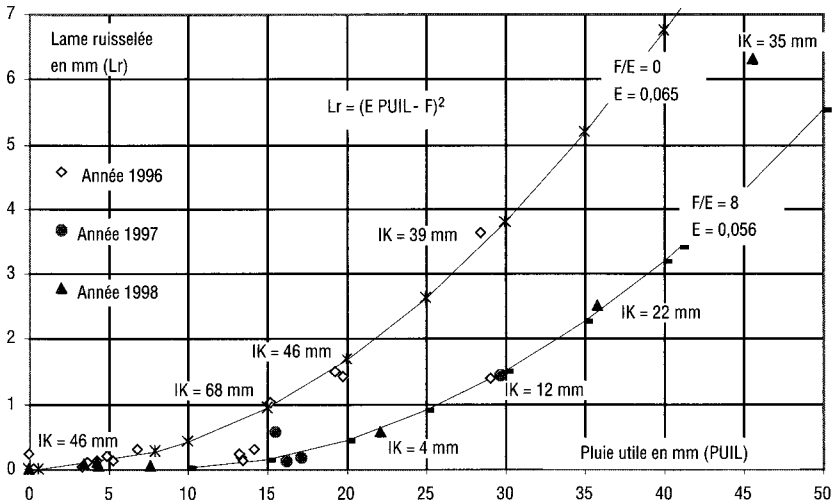


Figure 4 Relations entre la lame ruisselée (Lr) et la pluie utile (PUIL) sur le bassin versant El Viejo (ESTRADA AVALOS, 1999).
Relations between the depth of runoff (Lr) and the useful depth of rainfall (PUIL) on the catchment of El Viejo (ESTRADA AVALOS, 1999).

Cette figure montre qu’il n’est pas possible de considérer une seule valeur du paramètre F pour les trois années 1996, 1997 et 1998 mais que la forme de la relation se conserve, c’est-à-dire que le paramètre E peut être considéré, en première approximation, comme une constante. Pour caler le modèle quadratique, nous procéderons donc en deux étapes : dans une première étape nous chercherons à analyser les variations du rapport F/E en fonction de l’indice IK et dans une seconde étape nous analyserons les variations possibles du paramètre E.

Dans une première phase de calage du modèle, nous avons donc cherché à définir une relation entre le rapport F/E et l'indice des pluies antérieures IK , en considérant que plus cet indice était élevé, plus l'origine de la relation se rapprochait de l'origine ($PUIL = 0$; $L_r = 0$), ce que montre clairement la figure 4 pour le bassin-versant El Viejo. Le rapport F/E correspond en effet à la valeur limite de la pluie utile pour qu'elle engendre un ruissellement. Or, comme le montre la figure 4, cette valeur limite a tendance à s'annuler pour des valeurs de IK voisines de 50 mm. Nous avons donc considéré qu'il existait une relation linéaire entre le rapport F/E et IK et que le rapport F/E variait entre une valeur maximale F_0/E pour $IK = 0$ et une valeur nulle pour $IK = 50$ mm :

pour les bassins versants El Viejo, Carboneras, El Tullido et Pastelero, dont la superficie dépasse 1 km² :

$$F = 10 \cdot E \cdot \left(1 - \frac{IK}{50}\right) \quad \text{pour } IK < 50 \text{ mm} ; F = 0 \text{ pour } IK \geq 50 \text{ mm}$$

pour le bassin versant El Muerto, dont la superficie est inférieure à 0,5 km² :

$$F = 2,5 \cdot E \cdot \left(1 - \frac{IK}{50}\right) \quad \text{pour } IK < 50 \text{ mm} ; F = 0 \text{ pour } IK \geq 50 \text{ mm}$$

En ce qui concerne le paramètre E , l'analyse des variations de ce paramètre, F étant fixé par les relations précédentes, montre que les crues survenues au début du mois d'août 1996 présentent des valeurs nettement plus fortes que les autres et que les crues précédées d'averses de plus de 10 mm depuis moins de 24 heures avaient également des valeurs de E nettement plus fortes. La prise en compte de ces particularités conduit aux valeurs consignées sur le tableau 6 pour le coefficient de croissance quadratique E et pour la valeur limite de $PUIL$ qui lui est associée quand $F = 0$, soit $PUIL^* = 1/(2 E^2)$.

Pour les valeurs fortes de E ($E > 0,10 \text{ mm}^{-0,5}$), la valeur limite supérieure de $PUIL$, notée $PUIL^*$, est égale à :

$$\begin{aligned} PUIL^* &= 5 + F/E && \text{pour } E = 0,3 \\ PUIL^* &= 12 + F/E && \text{pour } E = 0,2 \\ PUIL^* &= 50 + F/E && \text{pour } E = 0,1. \end{aligned}$$

Au-delà de ces valeurs limites, il ne faut plus utiliser le modèle quadratique car il aboutit à un accroissement de la lame ruisselée supérieur à l'accroissement de la hauteur pluviométrique. Au-delà du seuil $PUIL^*$, qui correspond à la valeur de la lame ruisselée L_r^* , on peut alors considérer que tout accroissement de la pluie utile ruisselle dans son intégralité et que la lame ruisselée est égale à la somme :

$$L_r = L_r^* + (PUIL - PUIL^*)$$

Pour valider l'utilisation des paramètres du modèle quadratique, nous avons utilisé le critère de Nash (NASH et SUTCLIFFE, 1970) de la forme :

$$CNash = 1 - \frac{\sum (L_c - L_0)^2}{\sum (L_c - L)^2} \quad (6)$$

où L_c est la lame ruisselée calculée par le modèle,

L_0 est la lame ruisselée observée,

\bar{L} est la moyenne des lames ruisselées observées.

Tableau 6 Coefficients de croissance quadratique (E) et valeurs limites de la pluie utile ($1/2 E^2$) pour les bassins versants expérimentaux du ranch Atotonilco.

Table 6 Quadratic increasing coefficient (E) and limit values of the useful depth of rainfall ($1/2 E^2$) on the small catchments in the Atotonilco ranch.

Bassins versants	Valeurs de E en $\text{mm}^{-0.5}$ et valeurs limites de PUIL pour IK > 50 mm							
	Valeur moyenne		Début août 1996 végétation faible		Averses espacées de 24 h		Averses espacées de quelques heures	
	E	$1/2.E^2$	E	$1/2.E^2$	E	$1/2.E^2$	E	$1/2.E^2$
El Viejo	0,056	159	0,074	91	0,072	96	–	–
Carboneras	0,064	122	0,11	41	0,092	59	(0,32)	5
El Muerto	0,083	72	0,11	41	(0,18)	15	–	–
Pastelero	0,067	111	(0,17)	17	0,12	35	0,12	35
El Tullido	0,056	159	0,12	35	0,12	35	(0,27)	7

Les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent à des problèmes d'utilisation du modèle en raison de la faible valeur limite de PUIL.

En utilisant la seule année 1996 pour les calculs, nous présentons sur le tableau 7 les valeurs du critère de Nash après la première phase de calage pour laquelle le paramètre F est considéré comme constant et après la seconde phase de calage qui prend en compte les observations des années 1997 et 1998 et utilise une fonction linéaire du paramètre F en fonction de l'indice IK.

Tableau 7 Valeurs du critère de Nash pour l'année 1996.

Table 7 Values of the Nash criterion for the year 1996.

Bassins versants	El Viejo	Carboneras	El Muerto	Pastelero	El Tullido
Phase 1	0,56	0,94	0,88	0,58	0,30
Phase 2	0,72	0,95	0,86	0,82	0,44

L'examen de ce tableau permet de conclure à une amélioration, à l'exception du bassin El Muerto, de la plupart des ajustements au cours de la seconde phase de calage.

Pour justifier a posteriori notre démarche, nous avons également comparé au tableau 8 les sommes des écarts quadratiques entre lames ruisselées calculées et lames ruisselées observées d'une part pour un modèle quadratique utilisant la pluie journalière (Pi) comme variable principale et d'autre part pour un modèle quadratique utilisant la notion de pluie utile (PUIL). Au vu de ce tableau, à l'exception du bassin de Pastelero pour lequel le critère d'ajustement n'est réduit que de moitié, le gain en précision sur l'estimation des lames ruisselées apparaît considérable.

Tableau 8 Valeurs de la somme des écarts quadratiques entre lames ruisselées calculées et lames ruisselées observées sur la période 1996-1998.

Table 8 Values of the sum of quadratic differences between runoff calculated and runoff observed during the period 1996-1998.

Bassins versants	El Viejo	Carboneras	El Muerto	Pastelero	El Tullido
Modèles quadratiques utilisant comme variables principales Pj et PUIL					
Pj	95,4	31,4	66,7	8,9	35,2
PUIL	4,2	3,7	15,1	4,0	7,9

5 – CONCLUSION

À l'échelle des petits bassins versants de la zone semi-aride du Nord-Mexique, il apparaît nécessaire de faire intervenir les intensités de pluie dans la modélisation des ruissellements en raison de la grande variabilité de la forme des hyétoigrammes au cours de la saison des pluies. Pour quantifier les apports en eau à l'échelle de bassins versants équipés de petits barrages dans un ranch d'élevage extensif du Nord-Mexique, le ranch Atotonilco, nous avons donc défini un modèle hydrologique global utilisant les concepts d'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) et de pluie utile (PUIL), somme des pluies dont l'intensité dépasse la valeur limite IL. L'analyse des faibles écoulements et des averses qui ne produisent pas de ruissellement montre par ailleurs que l'intensité de pluie limite du ruissellement décroît avec l'indice d'antériorité des pluies (indice IK).

Les corrélations entre la lame ruisselée, ou sa racine carrée, et les intensités maximales de pluie sur différents pas de temps ont montré que le pas de temps de 30 minutes était le plus approprié pour définir l'intensité de pluie limite du ruissellement sur des bassins de superficie comprise entre 0,1 et 5 km². La valeur du coefficient de décroissance exponentielle de l'indice d'antériorité des pluies (IK) en fonction du temps apparaît plus difficile à définir objectivement. Il a été pris arbitrairement égal à 0,1 jour⁻¹ en référence aux résultats obtenus à l'échelle des parcelles expérimentales (60 m²), de telle sorte que l'indice IK croisse au cours de la saison des pluies.

Dans le ranch Atotonilco, zone montagneuse semi-aride où la végétation est bien conservée par une gestion rationnelle des pâturages, les relations entre la pluie utile et la lame ruisselée présentent une forme parabolique, sauf lorsque des averses de plus de 10 mm sont espacées de quelques heures. Dans ce cas, les valeurs de la pluie utile peuvent invalider la relation parabolique dont la pente devient supérieure à 1. Pour les averses espacées de quelques heures, il est donc suggéré de limiter l'utilisation des relations quadratiques aux valeurs de pluie utile pour lesquelles cette pente est inférieure à l'unité et d'extrapoler au-delà en considérant que toute pluie utile excédentaire ruisselle.

À l'échelle annuelle, les coefficients de ruissellement sont faibles et ne dépassent pas 4 % en 1996 sur le bassin le plus apte au ruissellement situé sur matériaux calcaires et colluviaux. Ils sont particulièrement faibles pour les bassins versants sur basaltes ou conglomérats basaltiques (0,5 % une année sur 2 ou 3). À l'échelle des averses, les coefficients de ruissellement n'ont pas

dépassé 20 % pour le bassin versant d'El Muerto (0,15 km²), 15 % pour le plus grand bassin (El Tullido, 4 km²).

Les relations hydro-pluviométriques définies à partir des observations réalisées sur les 7 bassins versants représentatifs du ranch Atotonilco ont été ensuite utilisées dans un but de transposition des résultats à l'échelle du ranch et dans un but de simulation des écoulements afin de générer de longues séries d'apports dans les petites retenues. Une typologie hydrologique des 61 bassins versants du ranch Atotonilco, équipés de petites retenues, a permis la définition des règles de transposition du modèle quadratique à l'ensemble du ranch (ESTRADA AVALOS, 1999).

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient le CENID-RASPA (Mexique) et l'IRD (France), plus particulièrement Monsieur Ignacio Sánchez Cohen, directeur du CENID-RASPA, Messieurs Jean-Marie Fritsch, responsable de l'UR « Usages de l'eau », et Jean Albergel, responsable du programme Petits Barrages à l'IRD.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERGEL J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. *Éditions de l'ORS-TOM, Paris, coll. Études et Thèses*, 341 p.
- CASENAVE A., 1982. Le mini-simulateur de pluies. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. XIX n° 4*, 207-227.
- CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. *Éditions de l'Orstom (nouvellement IRD), Coll. Didactiques*, 229 p.
- ESTRADA AVALOS J., 1999. Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. *Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc*, 462 p.
- LINSLEY R. K., KOHLER M. A., PAULHUS J. L. H., 1949. Applied hydrology. *Mac Graw Hill Book Company, New-York, chap. 16*, 414-418.
- MANSOUR R., 2000. Anthropisation d'un petit bassin versant sahélien : influence sur l'infiltration et le ruissellement. *Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, France*, 545 p.
- NASH J. E. and SUTCLIFFE J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principle. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- SEGUIS L., 1986. Recherche, pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée), et sa régionalisation. *Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, France*, 325 p.
- THIÉBAUX J.-P., 2000. Rapports annuels des campagnes hydrologiques dans le ranch Atotonilco. Années 1996, 1997, 1998 et 1999. CENID RASPA / IRD, Gomez Palacio.

-
- VIEUX B. et GAUER N., 1994. Finite-element modeling of storm water runoff using Grass GIS. *Micocomputers in Civil Engineering* n° 9, Blackwell, Oxford, UK, 263-270.
- WOOLHISER D. A., SMITH D. R. E. And GOOLDRICH D. C., 1989. A Kinematic Runoff and Erosion Model. *Documentation and user manuel, USDA, ARS*, 92 p. + annexes.