

Centre de Recherches en Physique de
l'Environnement Terrestre et Planétaire

DOCUMENT



n° 16277

THESE
présentée par
François Jarry
pour l'obtention du titre de
Docteur en géographie de l'Université PARIS 7

Le ruissellement sur les terres agricoles

**Approché par simulation de pluie
et par télédétection**

Soutenue le 11 juin 1987 devant
le jury composé de :

Y. DEWOLF
O. DOLLFUS
M. NORMAND
F. VERGER
D. VIDAL-MADJAR

LE RUISSELLEMENT SUR LES TERRES AGRICOLES

APPROCHE PAR SIMULATION DE PLUIE ET PAR INTERPOLATION

<u>INTRODUCTION</u>	13
<u>PREMIERE PARTIE : PRESENTATION GENERALE DE L'ETUDE</u>	17
<u>CHAPITRE I - LE CADRE REGIONAL DE L'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DE L'ORGEVAL</u>	19
<u>1 - PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'ORGEVAL</u>	19
<u>2 - SITUATION - HYDROGRAPHIE - CLIMAT</u>	24
<u>3 - GEOLOGIE : STRATIGRAPHIE ET STRUCTURE</u>	24
<u>4 - LE SECTEUR D'EXPERIMENTATION - LE SOUS-BASSIN DE BUIHEIL</u>	27
<u>CARACTERISTIQUES GENERALES ET PEDOLOGIQUES</u>	
<u>CHAPITRE II : LE RUISSELLEMENT : PROBLEMES DE MESURE</u>	3s
<u>1 - MOTIVATIONS DE L'ETUDE</u>	3s
<u>2 - UNE METHODE CLASSIQUE DE CALCUL DE CRUE POUR PETITS BASSINS RURAUX</u>	38
<u>LA METHODE DU S.C.S.</u>	
<u>3 - LES METHODES CLASSIQUES DE MESURE DE L'INFILTRATION</u>	40
<u>3.1. Méthode Muntz</u>	42
<u>3.2. Méthode Muntz-Piogen</u>	42
<u>3.3. Méthode Porchet</u>	43
<u>3.4. Méthode Verrière</u>	43

4	LA MESURE DU RUISSELLEMENT SOUS PLUIES SIMULEES	44
4.1.	Influence de l'interface sol-atmosphère sur le ruissellement.	44
4.2.	Principe de la simulation de pluie	47
4.3.	Energie cinétique de la pluie	49
4.4.	Les différents simulateurs de pluie	54
4.4.1.	Simulateurs à goutteurs	55
4.4.2.	Simulateurs à asperseurs	55
4.4.3.	Description du simulateur utilisé au CEMAGREF	58
4.5.	Choix de l'intensité de la pluie simulée	60
4.6.	Problèmes de mesure sous pluies simulées	63
5	CHOIX DES PARAMETRES	66
5.1.	Paramètres agronomiques	67
5.2.	Paramètres de ruissellement	69
5.3.	Choix des sites de mesures	75
	 DEUXIEME PARTIE. ANALYSE DES ESSAIS	79
	 CHAPITRE I : PROTOCOLE DE MESURE ET DEROULEMENT D'UN ESSAI	81
	 CHAPITRE II : PLAGE DE VARIATION DES ESSAIS	85
1 -	INTERVALLE DE VARIATION DES ESSAIS ET DES PARAMETRES MESURES	87
2 -	VARIABILITE DU RUISSELLEMENT OBSERVE SOUS PLUIES SIMULEES	90
3 -	COMPARAISON ECOULEMENT SUR LE BASSIN VERSANT ET RUISSELLEMENT SOUS PLUIES SIMULEES	92

**CHAPITRE III : RECHERCHE DE PARAMETRES EXPLICATIFS
DE LA VARIABILITE DU RUISSELLEMENT**

	96
1 - <u>ANALYSE MONO-FACTORIELLE</u>	96
1.1. <u>Relation ruissellement/pente</u>	96
1.2. <u>Relation ruissellement/paramètres pédologiques</u>	98
1.3. <u>Relation ruissellement/densité apparente</u>	103
1.4. <u>Relation ruissellement/humidité du sol</u>	103
1.5. <u>Relation ruissellement/végétation</u>	108
1.6. <u>Relation ruissellement/type de culture</u>	108
1.7. <u>Relation ruissellement/rugosité</u>	111
2 - <u>ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES</u>	119
3 - <u>W</u>	124
3.1. <u>Le modèle de régression multiple : présentation</u>	124
3.2. <u>Régressions sur groupe A</u>	126
3.2.1. Analyse sur l'ensemble du groupe	126
3.2.2. Analyse par type de culture	137
3.2.2.1. Analyse sur semis d'hiver	137
3.2.2.2. Analyse sur semis de printemps	139
3.3. <u>Régressions sur groupe B</u>	139
3.4. <u>Régressions sur groupe C</u>	146
3.5. <u>Régressions sur groupe D</u>	149
3.6. <u>Conclusion sur les régressions multiples effectuées</u>	152
3.6.1. Nature des relations obtenues	152
3.6.2. Utilisation des résultats	154
3.7. <u>Bilan des analyses statistiques</u>	155

CHAPITRE IV : UTILISATION DES RESULTATS OBTENUS

157

~~1 - APPLICATION A UN BASSIN VERSANT~~

157

2 - APPLICATION A LA LIMITATION DE L'EROSION

161

2.1. Théorie de l'exportation des ma-

161

2.2. Etude de l'exportation de matériel au cours de la pluie simulée

166

3 - CONCLUSION PARTIELLE : APPORT DE LA SIMULATION DE PLUIE AUX ETUDES HYDROLOGIQUES

174

TROISIEME PARTIE : TENTATIVE DE GENERALISATION SPATIALE PAR TELEDETECTION

179

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE TELEDETECTION

181

1 - INTRODUCTION

181

1.1. Bases de la télédétection

183

1.2. Les capteurs

187

2 - LES MOYENS MIS EN OEUVRE

190

CHAPITRE II : LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE

193

CHAPITRE III : LA RADIOSERIE DE TERRAIN

197

1 - L'INSTRUMENTATION

197

2 - LES MESURES

197

3 - RESULTATS

199

INTRODUCTION

En 1984, Monsieur ~~Haroun~~ TAZIEFF, délégué aux risques majeurs, écrivait dans son rapport annuel (TAZIEFF, 1984) "... Des déboisements, des défrichements, des comblements de mares naturelles ont accru de façon très sensible le ruissellement. Ces modifications, y compris les pratiques culturelles, ont perturbé l'hydrologie des cours d'eau, et l'on constate une réduction des périodes de retour des crues". Sur l'ensemble des déclarations de zones sinistrées, en 1983, les **2/3** sont le fait des inondations. Celles-ci rappellent, et cela semble parfois nécessaire, que l'homme vit sur une planète vivante, non dans un milieu inerte. La technologie du 20ème siècle est parfois impuissante devant les phénomènes naturels, quand elle ne concourt pas à les provoquer ou à les amplifier. La sagesse ancestrale, ou la mémoire collective des événements naturels, est quelque peu défaillante : nul n'aurait songé, il y a quelques décennies, à construire une habitation dans le lit majeur d'une **rivière** sujette aux débordements. La mise en place de barrages écrêteurs a souvent rassuré et rallongé les périodes de retour des crues ; les impératifs **économiques**, la pression foncière et souvent l'absence d'études préalables ont banalisé les zones à risques. D'où la stupeur lorsque la crue inonde ! Plus de 60 % de zones sinistrées par suite d'inondations, cela mérite qu'on s'y intéresse !

Depuis 1675, date à laquelle **PENAULT**, ingénieur du roi, calcula que le débit de la Seine à PARIS correspondait au **sixième** de la pluie tombée, l'hydrologie a, bien sûr, fait des progrès. Elle s'est diversifiée aussi. Elle a acquis des méthodes d'observation et de calcul de plus en plus performantes et sophistiquées. Mais son objet, l'étude du rapport entre l'eau tombée et celle qui s'écoule, est toujours de nature très aléatoire.

En premier lieu parce que la pluie, son intensité, sa durée, son extension sont aléatoires. Et ensuite parce que les conditions dans lesquelles elle va être transférée vers l'exutoire, la rivière, le fleuve, la mer, sont très variables.

A l'échelle du continent ou du bassin versant de plusieurs milliers de kilomètres carrés on connaît bien les régimes, les probabilités d'occurrence d'un étiage ou d'une crue de niveau donné. A plus grande échelle, en revanche, il est plus délicat de prévoir les événements hydrologiques en raison de la variabilité de la pluie mais aussi du territoire qui la reçoit, et ceci d'autant plus que ses caractéristiques sont variables à l'échelle de temps saisonnière, mais parfois aussi pluriannuelle.

L'un des objectifs majeurs de l'hydrologie consiste justement à prédire quel sera le volume d'eau écoulé à l'issue d'un épisode pluvieux. La connaissance de ce volume permet de nombreuses applications : dimensionnement d'ouvrages de génie civil (ponts, barrages), définition de périmètres inondables, etc.

Sur les bassins versants pour lesquels on dispose de longues séries de mesures hydrométriques (pluies et débits), cette prédiction (on parle également de prédétermination) fait appel aux lois de probabilités : on détermine avec quelle fréquence se sont produits les épisodes de crue de tel ou tel niveau, et quelles sont leurs probabilités d'occurrence.

Sur les bassins versants pour lesquels on ne dispose pas de mesures le problème est plus ardu : on peut se référer aux données acquises sur les bassins versants jaugés proches mais avec le risque d'utiliser les valeurs antérieurement obtenues sur des espaces très différents (caractéristiques physiques, taille, forme, ..).

Il existe également des méthodes sommaires qui donnent un débit maximal en fonction de la superficie du bassin, sans estimation de la probabilité d'occurrence de ce débit, et avec une variation des résultats très importante

selon la méthode employée.

Des méthodes plus évoluées permettent de relier un débit de fréquence donnée (**décennale**, en général) à des paramètres physiques du bassin versant tels que la surface, la pente, la température annuelle, . . .

Cependant leur niveau de fiabilité apparaît relativement faible en particulier sur les petits bassins versants ruraux et il est nécessaire de n'employer ces méthodes qu'en vue d'une première estimation, une approche plus sûre consistant à comparer les résultats obtenus par ces méthodes avec ceux de bassins jaugés aussi proches et représentatifs que possible.

Dans l'arsenal des méthodes hydrologiques, celle qui a été employée ici - la simulation de pluie - se veut un retour à une approche naturaliste des phénomènes face à l'échec relatif (**CEMAGREF, 1984**) des méthodes probabilistes.

L'objectif fixé au début de ce travail de recherche était de voir si les résultats d'expériences de simulation de pluie pouvaient permettre une amélioration de méthodes de prédétermination des crues.

L'idée première était qu'il existe une similitude entre l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant et le ruissellement sur une surface de sol de 1 m² soumise à une pluie artificielle.

Bien qu'il existe un facteur supérieur à 10⁶ dans les rapports de superficie, une absence de concentration des écoulements dans l'expérience de simulation de pluie et une part non négligeable d'écoulement souterrain dans le débit d'une rivière, l'idée de cette première phase était de comparer les relations pluies-écoulements, naturelles et artificielles, afin d'isoler les expériences ayant les mêmes caractères d'écoulement que le bassin versant. Il aurait été alors possible, connaissant les conditions dans lesquelles une expérience de simulation de pluie doit être menée pour avoir une bonne similitude avec l'écoulement du bassin versant, de transposer les résultats obtenus sur bassin versant jaugé à un bassin

versant non jaugé et ceci au prix de quelques expériences de simulation de pluie.

Il s'est avéré au cours de cette première phase du travail que la variabilité des écoulements sous pluies simulées était très grande d'une part et que les coefficients de ruissellement pouvaient être très élevés et **même sans** rapport avec ceux observés à l'exutoire du bassin versant. Ces observations ont alors orienté le travail vers la recherche des causes de cette extrême variabilité.

Divers paramètres susceptibles d'expliquer cette variabilité ont été mesurés et reliés aux écoulements observés ce qui a permis de montrer leur influence, ou leur absence **d'influence**, sur le ruissellement. Cette étape a également permis de proposer des équations de prédiction du ruissellement à l'échelle du mètre carré.

Cependant la transposition de ces équations de la parcelle expérimentale à l'ensemble du bassin versant pose de nombreux problèmes. Dans la mesure où il n'était pas possible d'obtenir, pour de multiples raisons, des observations concomitantes des paramètres jugés caractéristiques du **ruissellement** et des écoulements à l'exutoire du bassin versant, la télédétection est apparue **comme** une solution possible.

Cette dernière phase du travail avait pour but de rechercher quels paramètres explicatifs du ruissellement pouvaient être **mesurés**, et par quels moyens ils pouvaient l'être de **façon** efficace. L'idée directrice était d'aboutir à un modèle de prédiction du ruissellement à l'échelle du bassin versant à partir de données acquises par télédétection.

C'est sur le bassin versant de **l'Orgeval**, représentatif d'une majorité de situations du Bassin Parisien, et bien connu tant du point de vue hydrologique que géologique ou pédologique, que cette étude a été menée.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, il est nécessaire de faire le point sur les objectifs initiaux et les résultats acquis. Le projet élaboré en 1984 au début de cette étude était ambitieux : essayer, par une technique nouvelle en hydrologie, de revenir à une approche naturaliste des relations pluie-écoulement sur un bassin versant agricole.

Projet ambitieux parce que les méthodes probabilistes n'avaient pas permis une modélisation efficace (TRICART, 1978) et parce que d'autres approches basées sur la physiographie des bassins n'avaient pas abouti non plus.

Dans ces conditions, tester une technique ayant, certes, déjà fait ses preuves dans le domaine de l'érosion des sols mais à une échelle disproportionnée par rapport à celle d'un bassin versant agricole, même de petite taille, pouvait apparaître comme une gageure.

Cette technique a pourtant permis de mettre en relief un certain nombre de points importants en ce qui concerne le ruissellement sur les terres agricoles. Le premier a été la variabilité des coefficients de ruissellement observés. En effet, sur un espace de taille réduite (80 ha) et a priori homogène, pour une même pluie simulée, la variation des coefficients est de l'ordre de 1 à 400. Si le bassin versant est homogène lorsqu'on l'examine dans son ensemble du point de vue de ses caractéristiques physiographiques, par contre à l'échelle du mètre carré sur lequel s'effectuent les essais cette homogénéité disparaît et l'on étudie des sites qui diffèrent plus ou moins les uns des autres par leurs caractéristiques pédologiques, de culture ou de taux de recouvrement.

C'est cette influence de différents paramètres physiques sur la genèse du ruissellement que nous avons voulu mettre en évidence par la suite.

Au cours de cette étape, le premier facteur mis en évidence a été l'état de surface.

Ce paramètre qui recoupe à la fois les notions de rugosité et de porosité de l'interface **sol-atmosphère** explique la plus grande partie de la variabilité constatée, et ceci bien que l'appréciation du facteur soit restée relativement sommaire (**soit** par le biais des classes de rugosité soit par la mesure du taux de mottes). Les analyses par régression multiple ont montré qu'il explique environ 70 % de la **variante** dans le meilleur des cas.

La répartition de ce **paramètre** selon les types de culture a également permis de noter que les **semis** d'hiver ont un état de surface plus rugueux que les **semis** de printemps. La relation observée entre l'état de surface et le coefficient de ruissellement est négative ce qui signifie que plus le taux de **mottes** (**ou** la rugosité) diminue plus le ruissellement augmente.

Nous avons ensuite cherché à relier le ruissellement à l'humidité de surface du sol, dans un premier temps à partir de mesures d'humidité pondérale, et nous n'avons pas observé de relation significative, puis dans un deuxième temps à partir de mesures d'humidité volumique. Cette deuxième variable est apparue faiblement significative avec toutefois une meilleure relation sur semis d'hiver que sur **semis** de printemps. Le déficit de saturation, qui exprime le volume poral disponible, n'est pas apparu plus significatif.

Nous avons également recherché des liaisons entre ruissellement et texture du sol.

Celle-ci semble être un paramètre explicatif notable soit par le biais **d'** indices tels que l'indice de **battance** ou le volume d'argile et de matière organique, **soit plus simplement** par la **somme** des fractions argileuses et organiques du sol.

Ce type de paramètre nécessite cependant, et c'est son principal inconvénient, un prélèvement sur chaque site expérimental, les mesures globales effectuées au niveau de la parcelle de culture n'ayant pas été suffisantes lors de nos expériences.

Bien que le taux de recouvrement de la ~~végétation~~ soit un paramètre ~~important~~, dans la ~~genèse~~ du ruissellement, il n'a Pas été mis en évidence lors des expérimentations menées. Ceci est dû au faible nombre de situations testées avec des taux de recouvrement variés puisque les semis, qui représentent l'essentiel de notre échantillon, ont des taux de recouvrement végétal faibles.

Enfin, le deuxième paramètre apparu important dans cette variabilité du ruissellement est le type de culture. On observe en effet dans nos expériences une relation entre les classes définies (~~semis~~ d'hiver et de printemps, récolte tassée et non tassée) et les écoulements observés.

Après cette variabilité observée et la mise en relief de paramètres explicatifs, il faut noter la part importante du ruissellement par rapport à l'infiltration lors de nos expériences,

La valeur moyenne des coefficients de ruissellement obtenus sur l'ensemble des essais s'élève à **32,5 %**.

Cette valeur regroupant des essais réalisés dans des conditions **très** diverses ne peut être prise que **comme** une indication. Par contre les valeurs moyennes obtenues en ne prenant en compte qu'un seul type de culture sont beaucoup plus représentatives, les essais ayant été effectués dans des situations semblables du point de vue de ce paramètre.

Sur semis d'hiver, la moyenne des Kr est de **27,3 %**, la médiane étant à **12,3 %**. Sur ~~semis~~ de printemps, la valeur moyenne des Kr s'élève à **39,7 %** et la médiane à **39,5 %**. La dispersion de ces essais regroupés par type de culture est beaucoup moins importante que sur l'ensemble de l'échantillon. Ces valeurs montrent d'une part que la variation est fonction du type de culture, les ~~semis~~ de printemps étant plus propices au ruissellement que les ~~semis~~ d'hiver, et d'autre part que la part du ruissellement peut être très élevée sur ces situations.

Ces situations ne sont, de plus, pas rares : les semis d'hiver sur le bassin versant de l'Orgeval représentent environ 60 % des surfaces cultivées et leurs caractéristiques évoluent peu pendant une longue période (de quatre à cinq mois).

Quant aux semis de printemps, la superficie qu'ils occupent est de l'ordre de 30 % sur notre secteur d'expérimentation et leurs caractéristiques restent semblables du point de vue du taux de recouvrement pendant environ deux mois. Cependant leur forte susceptibilité au ruissellement fait qu'ils peuvent contribuer beaucoup plus à un volume d'eau écoulée que des cultures d'hiver à superficie égale.

Nous avons vu que ces situations ne sont pas rares tant dans l'espace que dans le temps sur le bassin de l'Orgeval. Ce bassin lui-même n'est pas un cas isolé : en Ile de France de nombreux secteurs agricoles présentent des caractéristiques agropédologiques semblables. Il n'est donc pas absurde de penser que de telles valeurs de ruissellement peuvent s'observer en dehors de notre secteur d'étude.

Cependant nos expériences, rappelons-le, font appel à des intensité-durée-fréquence élevées, de période de retour de 20 à 25 ans. Pour des pluies de période de retour plus fréquente la valeur des coefficients de ruissellement est plus faible. Mais elle reste différenciée selon le type de culture notamment, ce qui remet en cause l'utilisation d'un coefficient de ruissellement moyen pour un bassin versant et donc la fiabilité de modèles de prédiction fondés sur un seul paramètre de ruissellement, invariable dans le temps et dans l'espace.

Le passage de l'échelle métrique à l'échelle du bassin versant pose de nombreux problèmes. En effet extrapoler des valeurs de ruissellement obtenues à l'échelle de la parcelle de 1 m² à celle de la parcelle d'exploitation n'est déjà pas simple en raison des hétérogénéités qui peuvent y exister d'une part et des phénomènes de concentration du

ruissellement qui peuvent ç'y produire C' autre part. On peut supposer que les phénomènes de ruissellement y sont amplifiés; à condition toutefois que la parcelle soit homogène. A l'échelle du bassin versant, les hétérogénéités sont certaines (diversité des types de cultures, des pentes et des sols) et il existe de multiples obstacles au ruissellement (zones de rétention ou d'infiltration tels que fossés, haies, routes) qui induisent une diminution des écoulements de surface. Il est donc très délicat de relier les mesures sur microparcelle de 1 m² aux écoulements à l'exutoire d'un bassin versant. La première étape en ce domaine consisterait à calculer le volume de ruissellement issu d'une pluie donnée en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque parcelle.

En raison des difficultés à obtenir ces informations par des méthodes classiques de relevé sur le terrain, nous avons voulu tester les capacités de la télédétection pour ce type d'approche, les paramètres de la genèse du ruissellement mis en évidence lors de la première étape étant les premiers recherchés.

Il s'agissait en priorité de relier les paramètres d'état de surface et d'humidité du sol aux mesures radiométriques, les types de cultures étant mieux connus du point de vue de leur réponse spectrale. La texture des sols ne pouvant être appréciée qu'indirectement (par l'humidité notamment) n'a pas fait l'objet de recherche spécifique.

La photographie aérienne ainsi que la radiométrie de terrain n'ont pas apporté tous les résultats escomptés. En fait, cela a tenu à un manque de mesures au sol pour la radiométrie, et à un trop grand délai entre les mesures sol et la date de prise de vue pour la photo aérienne, plus qu'à une inadéquation entre le paramètre à mesurer et le moyen de télédétection employé. D'autres campagnes de mesure pourraient permettre de préciser la validité de ces outils pour ce type de recherche.

Cependant, ils présentent d'ores et déjà à l'inconvénient d'être très dépendants des conditions climatiques. Cet inconvénient disparaît avec les mesures par télédétection en hyperfréquences. C'est de ces mesures par radar que nous avons retiré le plus d'informations. L'instrument est encore actuellement au stade de la recherche et les expérimentations menées sont utiles à la définition des caractéristiques des futurs satellites civils d'observation par radar.

Les expériences menées en 1985 et 1986 ont permis de montrer le grand intérêt de ce type de télédétection. En effet, après avoir mis en évidence quelques particularités liées à l'utilisation des hyperfréquences telles que l'effet de résonance des ondes sur les sillons ou l'influence de la rugosité sur le signal rétrodiffusé, nous avons pu obtenir une très bonne corrélation entre le signal radar et l'humidité de surface du sol. Cette bonne adéquation est stable dans le temps et dans l'espace, les résultats étant semblables à ceux obtenus précédemment sur d'autres régions.

A partir du signal radar étalonné, il a été possible de suivre les variations de comportement hydrique de différentes parcelles de culture et de montrer que ces variations sont notamment fonction de l'histoire culturale des parcelles. Par le biais de ces comportements hydriques il est également possible d'envisager une classification des terres selon des critères d'ordre pédologique.

Ce type d'information est susceptible d'être utilisé à la fois pour des applications agronomiques (conseil aux agriculteurs : travaux culturaux, irrigation, . . .) et pour des applications hydrologiques.

Sur le bassin versant de Mélarchez, nous avons en effet pu montrer que l'humidité moyenne de surface mesurée par radar pouvait être reliée à des mesures effectuées au sol et que la variation relative de cette humidité dans le temps pouvait être confrontée aux coulements observés à l'exutoire. La poursuite des recherches dans cette section permettra d'obtenir une

gamme plus variée de couples humidité moyenne - écoulement et d'envisager le développement de modèles de prévision basés sur l'information radar.

Ce travail qui a pu être mené à bien grâce à la collaboration de nombreuses équipes a permis d'apporter des éléments de réponse aux problèmes d'hydrologie des bassins versants ruraux. De nouvelles perspectives de recherche se sont ouvertes qu'il s'agit maintenant d'explorer.