La pluie et le topoclimat

Thierry VAN HAMME (1)

RÉSUMÉ

Lorsqu'on étudie les potentialités agroéconomiques d'une région à relief accidenté, une question importante qui se pose est de savoir s'il y a des orientations et des inclinaisons privilégiés au point de vue pluviosité. De plus, il est aussi important de comparer l'action érosive de l'eau, d'un versant à un autre, en fonction de l'inclinaison et de l'orientation.

Dans le cadre de cet article, on propose un modèle original permettant de répondre à ces questions. Ce modèle est particulièrement bien adapté aux problèmes agronomiques.

En effet, la modélisation proposée apporte de multiples informations permettant d'optimaliser l'utilisation des espaces ruraux en régions de collines et donc de microclimats liés à la topographie. De plus, la méthodologie présentée est très simple et peut ainsi être mise en œuvre sans disposer d'appareils sophistiqués, ceux-ci pouvant être considérés comme complément utile mais non indispensable.

Le modèle présenté est donc parfaitement adapté à tout pays en voie de développement à agriculture sur relief accidenté et donc à microclimat lié à la topographie.

MOTS CLÉS : Topoclimat — Pluie réelle — Pluie équivalente — Vecteur pluie — Pluviomètres inclinés — Quantité de mouvement associé à la pluie — Erosion hydraulique — Puissance érosive.

ABSTRACT

RAINFALL AND TOPOGRAPHY

When we study the agronomic potential of a region of broken relief, an important question is whether there are favourable orientations and slopes from the rainfall point of view. It is also important to compare the erosive action of water, from one aspect to another, as a function of slope and orientation.

In this article, we propose an original model answering these questions. This model is particularly well adapted to agronomic problems. Indeed the proposed modelling gives information to optimize the use of land in hill regions with climate related to topography. The methodology is very simple and may be used without sophisticated instrumentation, which may be a useful complement.

The model is adapted to developing countries with agriculture on broken relief and microclimate related to the topography.

KEY WORDS : Rainfall and topography — Actual rain — Equivalent rain — Rain vector — Inclined raingauge — Momentum associated with the rain — Hydraulic erosion — Erosive power.

INTRODUCTION

Lors d'un épisode pluviométrique, la quantité d'eau passant à travers une unité de surface est fonction de l'inclinaison et de l'orientation de l'unité de surface considérée. Il en va de même de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique et de la puissance.

L'importance de ce phénomène est telle qu'il figure au programme de la télédétection ; ainsi par exemple la station Saliout a pris des photos qui fournissent une information détaillée concernant l'asymétrie des précipitations sur les pentes ventées et non ventées, comme le signalent KOVAL et DESSINOV (1988).

(1) 34, av. des églantiers, 1180 Bruxelles Uccle, Belgique.

En ce qui concerne les surfaces de pentes agronomiquement utilisables, le modèle présenté dans le cadre de cet article permet de décrire vectoriellement et très simplement le phénomène pluie tant sous son aspect quantitatif que sous ses aspects quantité de mouvement, énergie cinétique et puissance.

On montre ainsi, qu'à la place d'une quantité de pluie moyenne annuelle, il serait agronomiquement intéressant d'utiliser un vecteur pluie moyen annuel, vecteur directement et aisément accessible par la modélisation proposée.

Cette modélisation a permis notamment de confirmer l'estimation de l'orientation à maximum de pluviosité à Uccle de SNEYERS (1989) basée sur l'analyse statistique des données climatologiques de l'IRM.

Il est à remarquer que cette modélisation permet également de déterminer le vecteur vitesse moyen des gouttes de pluie à un moment déterminé, et apporte ainsi un complément d'information à la méthode permettant la détermination expérimentale du vecteur vitesse d'une goutte de pluie par laser, exposée par St-GEORGES, BUCHLIN, RIETHMULLER, LOPEZ, LIETO et GRIOLET (1991).

1. MODÉLISATION DE LA PLUIE

La pluie est un phénomène complexe. Elle est constituée d'un très grand nombre de gouttes de dimensions différentes tombant dès lors suivant des trajectoires distinctes dans un fluide en mouvement : l'air. Ces gouttes se déforment, se heurtent et se cassent.

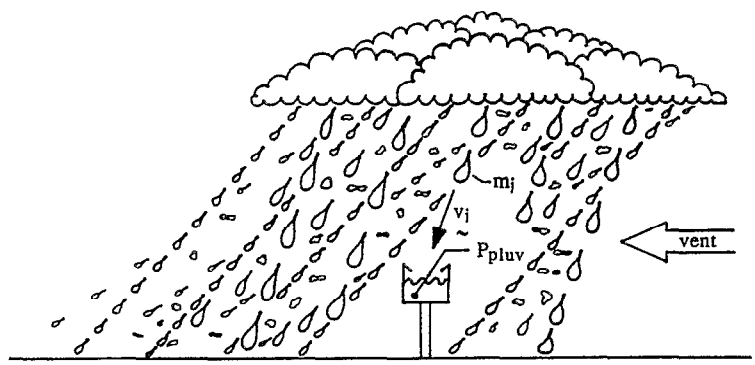

FIG. 1. — Pluie réelle stylisée et grandeurs associées.

Lorsqu'on étudie la pluie en tant qu'élément du topoclimat les caractéristiques du phénomène sont :

— la quantité d'eau de pluie (information indispensable à l'établissement du bilan hydrologique) ;

— la manière avec laquelle cette pluie tombe c'est-à-dire plus précisément le vecteur quantité de mouvement associé à cette quantité d'eau (information indispensable à toute étude des phénomènes d'érosion).

Dès lors, une modélisation topoclimatiquement intéressante d'un épisode pluviométrique est une modélisation permettant de répondre aux deux questions suivantes :

— Quelle quantité d'eau est tombée ?

— Comment cette quantité d'eau est-elle tombée ?

et cela, en fonction de la pente et de l'orientation des versants.

Considérons un épisode pluviométrique de durée T quelconque.

Cet épisode pluviométrique est caractérisé entre autres par la quantité de pluie à laquelle il donne lieu et par la quantité de mouvement avec laquelle cette quantité de pluie arrive sur le sol.

Cependant, il est important de remarquer qu'une infinité d'épisodes pluviométriques différents peuvent donner le même résultat au point de vue de ces grandeurs topopluviométriquement (1) intéressantes.

On introduit ainsi naturellement la notion de « pluie équivalente » à la pluie réelle au point de vue des grandeurs topopluviométriquement intéressantes (quantité d'eau en fonction de la pente et de l'orientation des versants et vecteur quantité de mouvement).

(1) Remarque : topopluviométrique vient de « topopluviométrie » qui est la mesure de la quantité de pluie tombant par unité de surface pendant une certaine période et un endroit donné en foncton de l'inclinaison et de l'orientation de la surface considérée.

Parmi toutes ces pluies équivalentes, la plus simple est évidemment une pluie de caractéristiques constantes, constituée de gouttes identiques suivant des trajectoires parallèles.

C'est par l'intermédiaire de cette « pluie équivalente », sur laquelle est basé le modèle (qui contient tous les aspects de la réalité importants pour le problème étudié et eux seuls), que l'on rend rigoureusement accessibles les caractéristiques de la pluie en tant qu'élément du topoclimat.

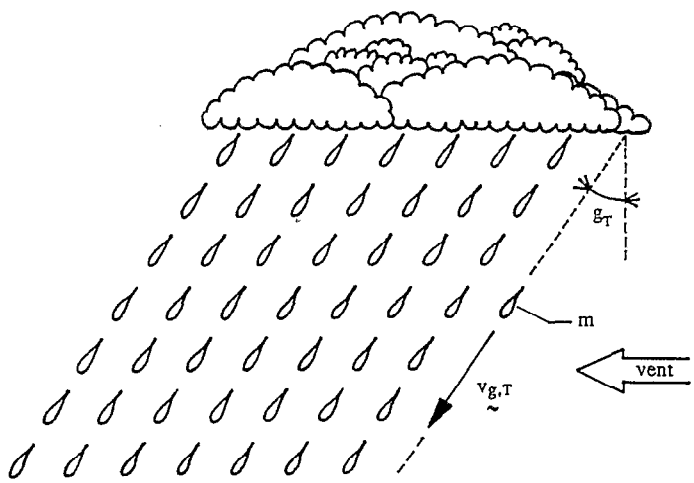

FIG. 2. — Pluie équivalente et grandeurs associées.

La pluie équivalente issue de la modélisation est équivalente à la pluie réelle au point de vue quantité d'eau. Elle donnerait donc évidemment une quantité d'eau dans un pluviomètre égale à P_{pluv} tout comme la pluie réelle.

La pluie équivalente, issue de la modélisation, a même quantité de mouvement que la pluie réelle,

d'où : $\Sigma\, m_j \cdot \underset{\sim}{v}_j = P_{pluv} \cdot \underset{\sim}{v}_{g,T}$ (1.1)

la somme portant sur toutes les gouttes de la pluie réelle tombant par unité de surface horizontale pendant l'épisode pluviométrique étudié.

2. ÉTUDE DE LA PLUIE DANS SON ASPECT QUANTITATIF

2.1. INTRODUCTION

Dans ce paragraphe on va, dans un premier temps, à l'aide de la notion de pluie équivalente, établir l'expression permettant de déterminer théoriquement exactement la pluviosité sur une pente d'inclinaison et d'orientation quelconques.

On donne naturellement à cette expression le nom de formule topopluviométrique.

Dans un deuxième temps, on propose une méthodologie expérimentale permettant de déterminer rigoureusement les paramètres de la formule topopluviométrique et de rendre ainsi cette formule directement utilisable.

2.2. EXPRESSION DE LA PLUVIOSITÉ SUR UNE PENTE D'INCLINAISON ET D'ORIENTATION QUELCONQUES

On suppose l'épisode pluviométrique de durée T (quelconque fixé).

2.2.1. Forme générale de l'expression de la pluviosité sur une pente

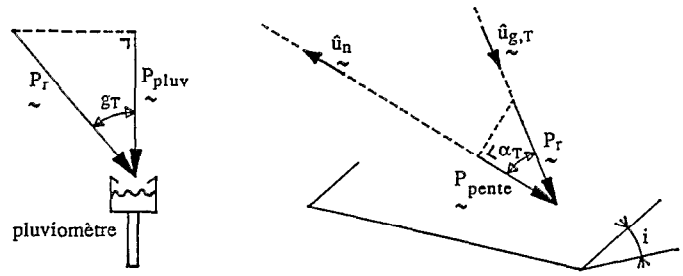

FIG. 3. — Pluie équivalente tombant sur un versant et grandeurs associées.

A l'aide de la figure 3, on obtient :

$$P_{pente} = P_r \cdot \cos \alpha_T \quad (2.1) \qquad \text{et} \qquad P_r = P_{pluv} / \cos g_T \quad (2.2)$$

d'où :

$$P_{pente} = (P_{pluv} / \cos g_T) \cdot \cos \alpha_T \quad (2.3)$$

2.2.2. Formule topopluviométrique

a) Coordonnées de $\hat{u}_{g,T}$

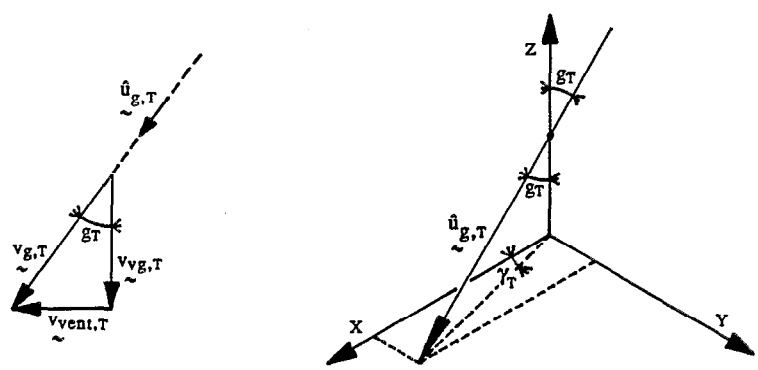

FIG. 4. — Trajectoire d'une goutte de la pluie équivalente dans le système d'axes choisi.

Par la figure 4, on a immédiatement :

coordonnées de $\hat{u}_{g,T} = (\cos \gamma_T \cdot \sin g_T, \sin \gamma_T \cdot \sin g_T, - \cos g_T)$ (2.4)

b) Coordonnées de P_r

Par (2.2) et (2.4), on a immédiatement :

$$P_r = P_{pluv} \cdot \text{tg}\, g_T \cdot \cos \gamma_T \cdot \hat{u}_x + P_{pluv} \cdot \text{tg}\, g_T \cdot \sin \gamma_T \cdot \hat{u}_y - P_{pluv} \cdot \hat{u}_z \quad (2.4')$$

Remarque : le versant sollicité au maximum du point de vue des grandeurs topopluviométriques est évidemment le versant perpendiculaire au vecteur $\mathbf{P}_r$

c) Coordonnées de $\underset{\sim}{\hat{u}}_n$

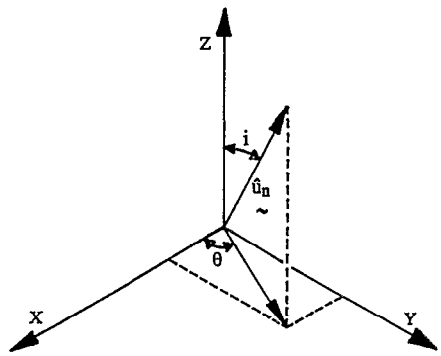

FIG. 5. — Normale à la pente dans le système d'axes choisi.

Remarquons que i, angle entre la normale à la pente et la direction verticale, est aussi évidemment l'inclinaison du versant étudié.

Par la figure 5, on obtient immédiatement :

coordonnées de $\underset{\sim}{\hat{u}}_n$ = (cos θ . sin i, sin θ . sin i, cos i)

d) Expression de cos α_T

Par la figure 3 : $\cos \alpha_T = - \underset{\sim}{\hat{u}}_n \cdot \underset{\sim}{\hat{u}}_{g,T}$

d'où, par les § a et c, on a immédiatement :

$$\cos \alpha_T = - \underset{\sim}{\hat{u}}_n \cdot \underset{\sim}{\hat{u}}_{g,T} = \cos g_T \cdot \cos i - \sin g_T \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma_T) \tag{2.5}$$

e) Formule topopluviométrique

Par les formules (2.5) et (2.3), on obtient immédiatement :

$$P_{pente} = P_{pluv} \cdot (\cos i - \operatorname{tg} g_T \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma_T)) \tag{2.6}$$

Dans la suite du texte on appellera l'expression (2.6), donnant la pluviosité sur une pente en fonction de son inclinaison et de son orientation, la « formule topopluviométrique ».

Pour que cette formule soit directement utilisable il faut, d'une manière ou d'une autre, rendre accessible la détermination de deux quantités :

g_T : l'angle que font les gouttes de la pluie équivalente avec la verticale ; et

γ_T : la direction vers laquelle se dirige le vent correspondant à la pluie équivalente.

Cela fera l'objet du paragraphe 2.3.

Par la figure 4 : $$\operatorname{tg} g_T = \frac{V_{vent,T}}{V_{vg,T}} \tag{2.7}$$

d'où la formule topopluviométrique (2.6) peut encore s'écrire :

$$P_{pente} = P_{pluv} \cdot (\cos i - \frac{V_{vent,T}}{V_{vg,T}} \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma_T)) \tag{2.8}$$

2.3. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES TOPOPLUVIOMÉTRIQUES

La pluie équivalente issue de cette modélisation est entre autres équivalente à la pluie réelle au point de vue quantitatif.

C'est pourquoi, on peut se servir d'expériences quantitatives sur la pluie réelle pour trouver des relations liant les paramètres de la pluie équivalente.

On donne le nom de montage topopluviométrique à tout montage pluviométrique permettant de mettre en évidence un nombre suffisant de relations pour la détermination des paramètres de la formule topopluviométrique.

De multiples montages topopluviométriques peuvent être proposés ; à titre d'exemple présentons le montage topopluviométrique qui a été utilisé lors de la campagne de mesures effectuée à Uccle pendant la période 1988-1991 et dont les résultats sont présentés dans le cadre de cet article.

Ce montage est constitué de cinq pluviomètres dont un pluviomètre horizontal et quatre pluviomètres d'inclinaison commune i et d'orientation nord, sud, est et ouest respectivement.

Cette disposition des pluviomètres a notamment l'avantage de permettre de disposer systématiquement, complémentairement au pluviomètre horizontal, de deux pluviomètres inclinés orientés face au vent et d'orientation la plus « indépendante possible » (cf. paragr. 2.4.).

Ainsi tout épisode pluviométrique peut être étudié de manière strictement semblable, les résultats obtenus peuvent être objectivement comparés et la précision sur les déductions issues de la modélisation peut être rigoureusement estimée.

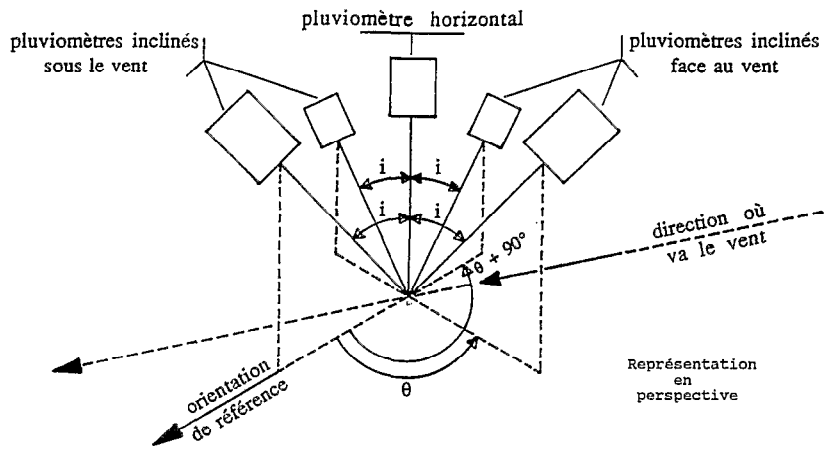

FIG. 6. — Montage topopluviométrique stylisé constitué par quatre pluviomètres inclinés et un pluviomètre horizontal.

Soient $P_{pente,\theta}$ et $P_{pente,\theta+90°}$ les hauteurs d'eau mesurées respectivement dans les deux pluviomètres inclinés face au vent.

Par (2.6) on obtient immédiatement le système d'équations suivant :

$$P_{pente,\theta} = P_{pluv} \cdot (\cos i - \operatorname{tg} g_T \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma_T)) \tag{2.9}$$

$$P_{pente,\theta+90°} = P_{pluv} \cdot (\cos i + \operatorname{tg} g_T \cdot \sin i \cdot \sin(\theta - \gamma_T)) \tag{2.9'}$$

avec γ_T appartenant à l'intervalle $[\theta+180°, \theta+270°]$

qui a comme solution :

$$\gamma_T = (\theta+180°) + \operatorname{arctg}\left(\frac{P_{pente,\theta+90°} - P_{pluv} \cdot \cos i}{P_{pente,\theta} - P_{pluv} \cdot \cos i}\right) \tag{2.10}$$

$$\operatorname{tg} g_T = \frac{\sqrt{(P_{pente,\theta+90°} - P_{pluv}.\cos i)^2 + (P_{pente,\theta} - P_{pluv}.\cos i)^2}}{P_{pluv} \cdot \sin i} \tag{2.11}$$

On a donc ainsi, à l'aide de mesures purement pluviométriques, déterminé les paramètres de la formule topopluviométrique.

La formule topopluviométrique permet dès lors de déterminer P_{pente} pour un versant à usage agronomique d'inclinaison i et d'orientation θ quelconques.

A l'aide de trois informations pluviométriques, on rend ainsi accessible, et ce pour une période T quelconque, une double infinité de quantités de prime abord inconnues, en l'occurrence $P_{pente}(\theta,i)$ pour tout θ et pour tout i avec $i \leqslant 90° - g_{max,T}$.

Remarque : Ces formules ne sont évidemment totalement rigoureuses pour tout θ,i que pour autant qu'elles s'adressent à la détermination de P_{pente} (i,θ) avec comme condition : $i \leqslant 90° - g_{max,T}$
$g_{max,T}$ étant l'inclinaison maximum des gouttes de pluie pendant la période d'étude T.
Ceci montre que les formules (2.10) et (2.11) conviennent parfaitement pour la détermination de P_{pente} (i,θ) sur des versants à usages agronomiques, c'est-à-dire des versants pour lesquels $i \leqslant 30°$.

2.4. Disposition la plus « indépendante possible » des pluviomètres d'un montage topopluviométrique comportant un pluviomètre horizontal

P_{pluv} étant connu, il reste à déterminer tg g_T et γ_T.
Plaçons un pluviomètre d'inclinaison i et d'orientation θ.
Par (2.6), on peut écrire : $P_{pente,\theta} = P_{pluv}.(\cos i - \text{tg } g_T \,.\, \sin i \,.\, \cos(\theta - \gamma_T))$.
Pour déterminer tg g_T et γ_T, il faut une seconde équation.
Plaçons un pluviomètre supplémentaire d'inclinaison i et d'orientation θ'.
Si $\theta' = \theta + 180°$; par (2.6) : $P_{pente,\theta} + P_{pente,\theta+180°} = 2.P_{pluv} \,.\, \cos i$

d'où la mesure de $P_{pente,\theta+180°}$ n'apporte qu'une confirmation de ce qu'on peut déduire à partir de $P_{pente,\theta}$ et de P_{pluv}.

Par contre, les valeurs de $P_{pente,\theta'}$ avec θ' appartenant à l'intervalle ouvert $]\theta,\theta + 180°[$ ne peuvent être déduites à partir de $P_{pente,\theta}$ et de P_{pluv} et dès lors apportent une information supplémentaire.

Dans le but d'avoir une équation supplémentaire, la plus indépendante possible de la première, il est donc tout naturel de mesurer $P_{pente,\theta'}$ pour $\theta' = \theta + 90°$, c'est-à-dire exactement entre θ et $\theta + 180°$.

Remarque : afin d'optimaliser l'emploi du matériel, le choix de $\theta' = \theta + 120°$ réduisant, dans le cas de l'utilisation d'un montage topopluviométrique symétrique du type de celui de la figure 6, à trois le nombre de pluviomètres inclinés, est aussi une solution élégante très défendable.

3. ÉTUDE DE LA PLUIE DANS SON ASPECT « ACTION ÉROSIVE »

3.1. Introduction

Le point de départ de l'érosion hydraulique est la destruction des grumeaux de sol.

Cette destruction résulte de deux facteurs : les sollicitations externes et internes agissant sur les grumeaux.

Les sollicitations internes sont provoquées par la surpression de l'air, qui n'a pas le temps de s'échapper, lorsque l'eau pénètre rapidement de toute part dans un grumeau à cause des forces capillaires et osmotiques.

Les sollicitations externes doivent leur origine au choc « goutte-grumeau » et au frottement dû au ruissellement de l'eau.

Un des intérêts du modèle présenté ici est qu'il permet de comparer rigoureusement l'importance relative de certains de ces facteurs d'un versant à un autre.

3.2. Quantité de mouvement associée à une pluie

3.2.1. Introduction

Compte tenu de la définition de la quantité de mouvement, on a immédiatement :

$$\underset{\sim}{Q}_{mvt} = Q_{mvt} \,.\, \underset{\sim}{\hat{u}}_{g,T} = \Sigma\, m_j \,.\, \underset{\sim}{v}_j = \underset{\sim}{P}_r \,.\, v_{g,T} \; (= P_r \,.\, \underset{\sim}{v}_{g,T} \text{ évidemment}) \qquad (3.1)$$

la somme portant sur toutes les gouttes de pluie traversant, pendant l'épisode pluviométrique étudié, une unité de surface perpendiculaire à $\underset{\sim}{\hat{u}}_{g,T}$.

3.2.2. Débit pluviométrique sur une pente à un instant t quelconque

Par la formule (2.8), on sait que pour tout T :

$$P_{pente} = P_{pluv} \cdot \left(\cos i - \frac{v_{vent,T}}{v_{vg,T}} \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma_T)\right)$$

Supposons : $T = \Delta t$ tend vers 0 et t appartient à Δt ; alors :
$v_{vent,\Delta t}$ tend vers $v_{vent}(t)$ = vitesse réelle du vent à l'instant t.
$\gamma_{\Delta t}$ tend vers $\gamma(t)$ = direction réelle vers laquelle se dirige le vent à l'instant t.
$v_{vg,\Delta t}$ tend vers $v_{vg}(t)$ = vitesse verticale des gouttes de pluie équivalente à l'instant t.
$\tilde{=}$ vitesse verticale des gouttes de la pluie réelle à l'instant t.

$$\frac{P_{pente,\Delta t}}{\Delta t} \text{ tend vers } \frac{\delta P_{pente}(t)}{\delta t} = \dot{P}_{pente}(t) \quad ; \quad \text{et :}$$

$$\frac{P_{pluv,\Delta t}}{\Delta t} \text{ tend vers } \frac{\delta P_{pluv}(t)}{\delta t} = \dot{P}_{pluv}(t)$$

d'où on obtient immédiatement l'expression du débit d'eau de pluie, par unité de surface, sur une pente à l'instant t :

$$P_{pente}(t) = \dot{P}_{pluv}(t) \cdot \left(\cos i - \frac{v_{vent}(t)}{v_{vg}(t)} \cdot \sin i \cdot \cos(\theta - \gamma(t))\right) \tag{3.2}$$

De la même manière, par (2.2), (2.4′) et la figure 4, on obtient :

$$\dot{P}_r(t) = \dot{P}_{pluv}(t) \,/\, \cos g(t) \; ; \tag{3.3}$$

$$v_{vent}(t) = v_g(t) \cdot \sin g(t) \quad \text{et :} \tag{3.4}$$

$$\underset{\sim}{\dot{P}}_r(t) = \dot{P}_{pluv}(t).\text{tg } g(t).\cos \gamma(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_x + \dot{P}_{pluv}(t).\text{tg } g(t).\sin \gamma(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_y - \dot{P}_{pluv}(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_z \tag{3.5}$$

Signalons que la limitation à la méthodologie, relative à une période quelconque T, présentée à la fin du paragraphe 2.3, n'existe évidemment pas à un instant quelconque t.

3.2.3. Détermination des caractéristiques de la pluie équivalente

Soit t un instant quelconque fixé :
Par la figure 4, on a immédiatement :

$$v_g(t) = v_{vent}(t) \cdot \text{cosec } g(t) \quad (3.6) \quad \text{et} \quad v_{vg}(t) = v_{vent}(t) \cdot \text{cotg } g(t) \tag{3.7}$$

Soit : $\underset{\sim}{Q}_{mvt}(t)$ = vecteur quantité de mouvement correspondant à l'intervalle de temps [0,t].

Par (3.1), la quantité de mouvement passant par unité de temps à l'instant t à travers une unité de surface perpendiculaire à $\underset{\sim}{\hat{u}}_g(t)$ peut s'écrire :

$$\underset{\sim}{Q}_{mvt}(t) = \underset{\sim}{\dot{P}}_r(t) \cdot v_g(t) \; (= \dot{P}_r(t) \cdot \underset{\sim}{v}_g(t) \text{ évidemment}) \tag{3.8}$$

Par (2.2), (2.4′), (3.4) et (3.8), on a immédiatement :

$$\underset{\sim}{Q}_{mvt}(t) = \dot{P}_r(t).v_{vent,x}(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_x + \dot{P}_r(t).v_{vent,y}(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_y - \dot{P}_{pluv}(t).v_g(t).\underset{\sim}{\hat{u}}_z \tag{3.9}$$

Soit T un épisode pluviométrique quelconque fixé :

Par (2.2), (2.4′), (3.1) et la figure 4, on a immédiatement :

$$\underset{\sim}{Q}_{mvt} = P_r \cdot v_{vent,x,T} \cdot \underset{\sim}{\hat{u}}_n + P_r \cdot v_{vent,y,T} \cdot \underset{\sim}{\hat{u}}_y - P_{pluv} \cdot v_{g,T} \cdot \underset{\sim}{\hat{u}}_z \tag{3.10}$$

Par (3.9), on peut aussi écrire :

$$\underset{\sim}{Q}_{mvt} = \left(\int_T \dot{P}_r(t).v_{vent,x}(t).dt\right).\underset{\sim}{\hat{u}}_x + \left(\int_T \dot{P}_r(t).v_{vent,y}.dt\right).\underset{\sim}{\hat{u}}_y - \left(\int_T \dot{P}_{pluv}(t).v_g(t).dt\right).\underset{\sim}{\hat{u}}_z \tag{3.11}$$

d'où, en identifiant (3.10) et (3.11), on obtient directement :

$$\underset{\sim}{v}_{vent,T} = \frac{\int_T \dot{P}_r(t).\underset{\sim}{v}_{vent}(t).dt}{p_r} = \frac{\int_T \dot{P}_{pluv}(t).\text{séc}\ g(t).\underset{\sim}{v}_{vent}(t).dt}{P_{pluv}.\text{séc}\ g_T} \tag{3.12}$$

$$v_{vent,x,T} = \frac{\int_T \dot{P}_r(t).v_{vent,x}(t).dt}{p_r} \quad (3.12') \quad ; \quad v_{vent,y,T} = \frac{\int_T \dot{P}_r(t).v_{vent,y}(t).dt}{P_r} \tag{3.12''}$$

$$v_{g,T} = \frac{\int_T \dot{P}_{pluv}(t).v_g(t).dt}{P_{pluv}} = \frac{\int_T \dot{P}_{pluv}(t).v_{vent}(t).\text{coséc}\ g(t).dt}{P_{pluv}} \tag{3.13}$$

et ainsi tous les paramètres de la « pluie équivalente », issue de la modélisation, ont été rendus accessibles.

Tout ceci montre que :

Si la détermination du vecteur pluie relatif à une période T, de norme P_r, ne demande que des mesures pluviométriques globales pour cette période, mesures pouvant se faire à l'aide du montage topopluviométrique présenté au paragraphe 2.3, il n'en va pas de même pour la recherche du vecteur quantité de mouvement (de norme Q_{mvt}) de la pluie correspondant à cette période.

En effet, les formules (3.1) et (3.3) tout comme les formules (3.10), (3.11), (3.12), (3.12') et (3.12") d'ailleurs, montrent que la détermination du vecteur quantité de mouvement correspondant à une pluie de durée T demande :

1. un montage topopluviométrique enregistrant en continu de manière à rendre accessible g(t), $\gamma(t)$, $\dot{P}_{pluv}(t)$ et toutes les grandeurs qui en découlent ;
2. un anémomètre enregistrant en continu de manière à rendre accessible $v_{vent}(t)$.

3.3. Quantité de mouvement érosive d'impact d'une pluie sur un versant

Si l'on considère les chocs totalement élastiques, la variation de la quantité de mouvement des gouttes de pluie au moment de l'impact pour l'épisode pluviométrique étudié, c-à-d la Q_{me}, est égale à : 2 . P_{pente} . $v_{g\perp,T}$.

Dans le cas contraire, si l'on considère les chocs comme étant totalement inélastiques, cette variation de quantité de mouvement vaut : P_{pente} . $v_{g\perp,T}$.

La réalité se trouve évidemment entre les deux cas susmentionnés et vaut :

$$k.\ P_{pente}\ .\ v_{g\perp,T} \qquad \text{avec k appartenant à l'intervalle : [1,2]} \tag{3.14}$$

Par les figures 3 et 4, on a immédiatement :

$$Q_{me} = k\ .\ P_r\ .\ v_{g,T}\ .\ \cos^2\alpha_T \tag{3.15}$$

avec : P_r donné par (2.2)
cos αT donné par (2.5)
vg,T donné par (3.13).

De plus, il est tout à fait logique de supposer que la nature des chocs « gouttes-grumeaux » ne dépend pas de l'inclinaison et de l'orientation des versants.

Cette hypothèse très réaliste rend accessible la comparaison rigoureuse de la quantité de mouvement érosive d'une pluie d'un versant à un autre.

Soient les versants 1 et 2.
On a immédiatement :

$$Q_{me,1} \ / \ Q_{me,2} = \cos^2 \alpha_{T,1} \ / \ \cos^2 \alpha_{T,2}. \tag{3.16}$$

Cette relation montre qu'on peut comparer la quantité de mouvement érosive reçue par deux versants d'inclinaisons et d'orientations différentes sans faire d'hypothèses à propos de la nature du choc au moment de l'impact et sans devoir disposer d'appareils enregistrant en continu.

La relation (3.16) est importante « agronomiquement parlant » puisque la notion de quantité de mouvement érosive est directement liée à la notion de surpression déstabilisatrice que subit le grumeau de sol au moment de l'impact.

3.4. Énergie cinétique érosive d'impact d'une pluie sur un versant

Si l'on considère les chocs totalement inélastiques, la variation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie au moment de l'impact pour l'épisode pluviométrique étudié, c-à-d l'E_{ce}, est égale à : $0{,}5 \ . \ P_{pente} \ . \ v^2_{g\perp,T}$.

Dans le cas contraire, en supposant les chocs totalement élastiques, cette variation d'énergie cinétique vaut 0.

Comme on l'a déjà mentionné dans le paragraphe 3.4, la réalité se trouve évidemment entre ces deux cas extrêmes et vaut par (3.14) :

$$0{,}5 \ . \ (2-k) \ . \ P_{pente} \ . \ v^2_{g\perp,T} \quad \text{avec } k \text{ appartenant à l'intervalle } [1,2] \tag{3.17}$$

Par les figures 3 et 4, on a immédiatement :

$$E_{ce} = 0{,}5 \ . \ (2-k) \ . \ P_r \ . \ v^2_{g,T} - \cos^3\alpha_T \tag{3.18}$$

avec : P_r donné par (2.2)
cos αT donné par (2.5)
vg,T donné par (3.13).

De plus, en considérant à nouveau que la nature des chocs : « goutte-grumeaux » ne dépend pas de l'inclinaison et de l'orientation des versants, on a immédiatement pour deux versants quelconques 1 et 2 :

$$E_{ce,1} \ / \ E_{ce,2} = \cos^3\alpha_{T,1} \ / \ \cos^3\alpha_{T,2}. \tag{3.19}$$

Cette relation est très importante « agronomiquement parlant » puisqu'elle permet de comparer rigoureusement l'énergie cinétique érosive d'impact d'un versant à un autre sans faire d'hypothèses à propos de la nature du choc au moment de l'impact et sans devoir disposer d'appareils enregistrant en continu.

3.5. Puissance érosive instantanée d'une pluie

a) Puissance instantanée d'une pluie passant par unité de surface à travers une surface perpendiculaire à $\underset{\sim}{u}_g(t)$

$$W(t) = 0{,}5 \ . \ P_r(t) \ . \ v^2_g(t). \tag{3.20}$$

b) Puissance érosive instantanée d'une pluie

Par (3.18), on a immédiatement :

$$W_e(t) = 0{,}5 \ . \ (2 - k) \ . \ \dot{P}_r(t) \ . \ v^2_g(t) \ . \ \cos 3\alpha(t) \tag{3.21}$$

avec : P_r, cos α_T et $v_{g,T}$ donné par (2.2), (2.5) et (3.13) respectivement

d'où, en considérant à nouveau que la nature des chocs : « goutte-grumeau » ne dépend pas de l'inclinaison et de l'orientation des versants, on a immédiatement pour deux versants quelconques 1 et 2 :

$$W_{e,1}(t) \ / \ W_{e,2}(t) = \cos^3\alpha_1(t) \ / \ \cos^3\alpha_2(t). \tag{3.22}$$

Comme les formules (3.20), (3.21) et (3.22) le confirment :

— la comparaison de la puissance érosive instantanée d'une pluie d'un versant à un autre nécessite un montage topopluviométrique enregistrant en continu ;

— la détermination de la puissance instantanée et de la puissance érosive d'une pluie exige de plus un anémomètre enregistrant la vitesse du vent en continu.

4. APPLICATIONS EXPÉRIMENTALES ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction

Après divers essais révélateurs en zone rurale, il est apparu qu'il était intéressant de choisir comme site de mesure, pour une expérience de longue durée, un site qui était non seulement en atmosphère topoclimatiquement non perturbée mais qui de plus se trouvait à proximité d'une station climatologique pouvant servir de référence au point de vue pluviométrie sur une surface horizontale, direction et vitesse du vent, types de nuages à l'origine de la pluie, etc.

Le site retenu a été le sommet du toit du bâtiment central de l'Observatoire royal de Belgique, situé à côté de l'Institut royal météorologique de Belgique, station n° 447 de l'Organisation météorologique mondiale.

C'est ainsi que fut conçu, réalisé et mis en place sur ce site, dans le courant du mois de mars 1988, un dispositif topopluviométrique du type de celui décrit à la figure 6. C'est avec ce dispositif que furent collationnées les données relatives à trois années d'observations présentées dans cet article (cf. fig. 7 à 16).

4.2. Discussions

Les trois années d'observations ont montré que, si les vecteurs pluies d'un jour à l'autre et d'un mois à l'autre peuvent être très différents en norme, direction et sens (cf. fig. 7, 8, 9 et 10), il n'en va plus de même au niveau annuel où les vecteurs pluies ont quasiment, en composante horizontale, même direction, même sens, et dans l'espace, des directions, sens et normes de même ordre de grandeur (cf. fig. 11 et 12).

Notons que, si les vecteurs pluies mensuels présentent une variabilité nettement plus grande d'une année à l'autre, cela n'empêche pas que la notion de vecteur pluie moyen mensuel présente un grand intérêt ne fusse que par le fait que des caractéristiques communes se retrouvent chez des groupes de mois identiques d'une années à l'autre.

Par exemple : l'effet topopluviométrique annuel semble dû essentiellement à la période d'octobre à février inclus (cf. fig. 9).

Les trois années d'observations ont confirmé également l'importance de la notion de pluviosité différentielle en fonction de la pente et de l'orientation des versants et ont permis la quantification et la comparaison d'un versant à un autre (cf. fig. 13, 14, 15 et 16).

De plus, la comparaison de la quantité de mouvement érosive d'impact et de l'énergie cinétique érosive d'impact d'un versant à un autre a montré l'importance de l'approche vectorielle du phénomène pluie dans l'étude des phénomènes d'érosion (cf. fig. 13, 14, 15 et 16).

5. CONCLUSIONS

Le modèle original, proposé dans le cadre de cet article, a permis de montrer que l'approche vectorielle du phénomène pluie, sous ses aspects quantitatif et action érosive relative, ne nécessitait ni appareillages coûteux ni mesures ou méthodologies compliquées.

De plus, les résultats expérimentaux présentés illustrent l'importance des informations, que l'on peut obtenir avec un simple dispositif topopluviométrique comme celui présenté à la figure 6, et ce tant du point de vue disponibilité en eau de pluie que du point de vue action érosive de cette eau.

L'intérêt de l'utilisation de pluviomètres judicieusement inclinés et orientés est également évident en ce qui concerne les pays en voie de développement.

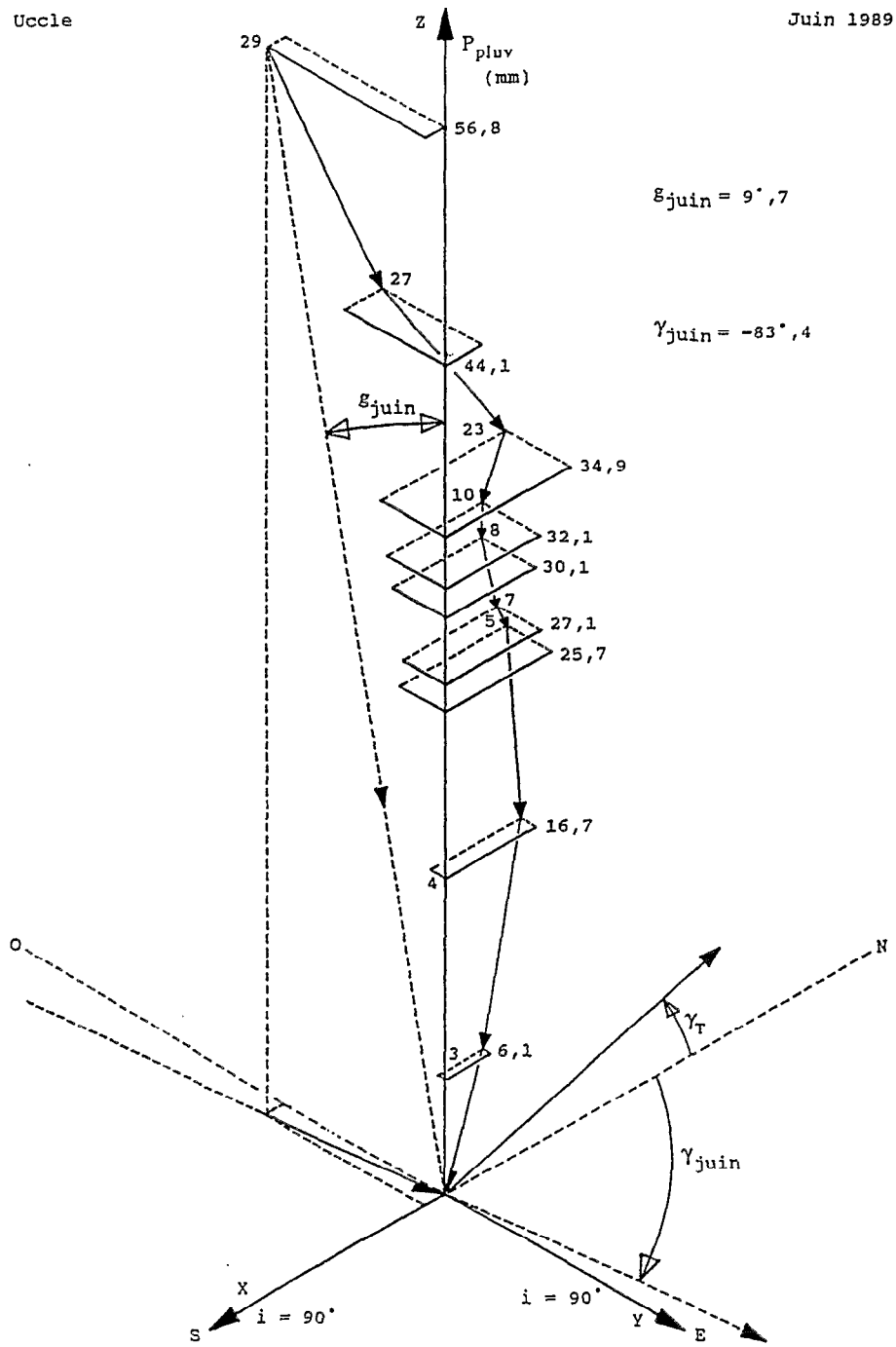

FIG. 7. — Représentation dans l'espace des vecteurs pluies journaliers relatifs au 15e mois d'observations.

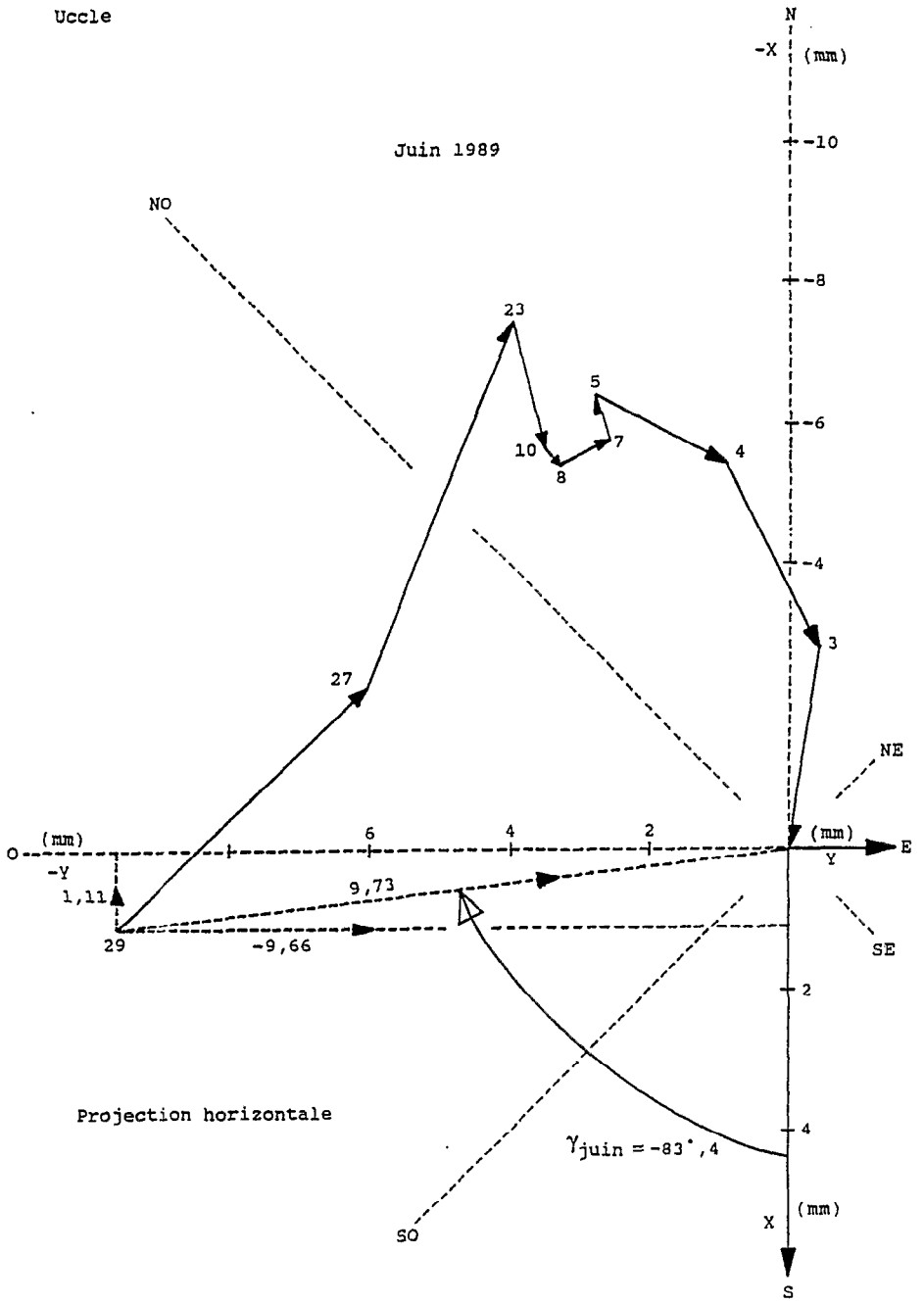

FIG. 8. — Représentation de la composante horizontale des vecteurs pluies journaliers relatifs au 15e mois d'observations.

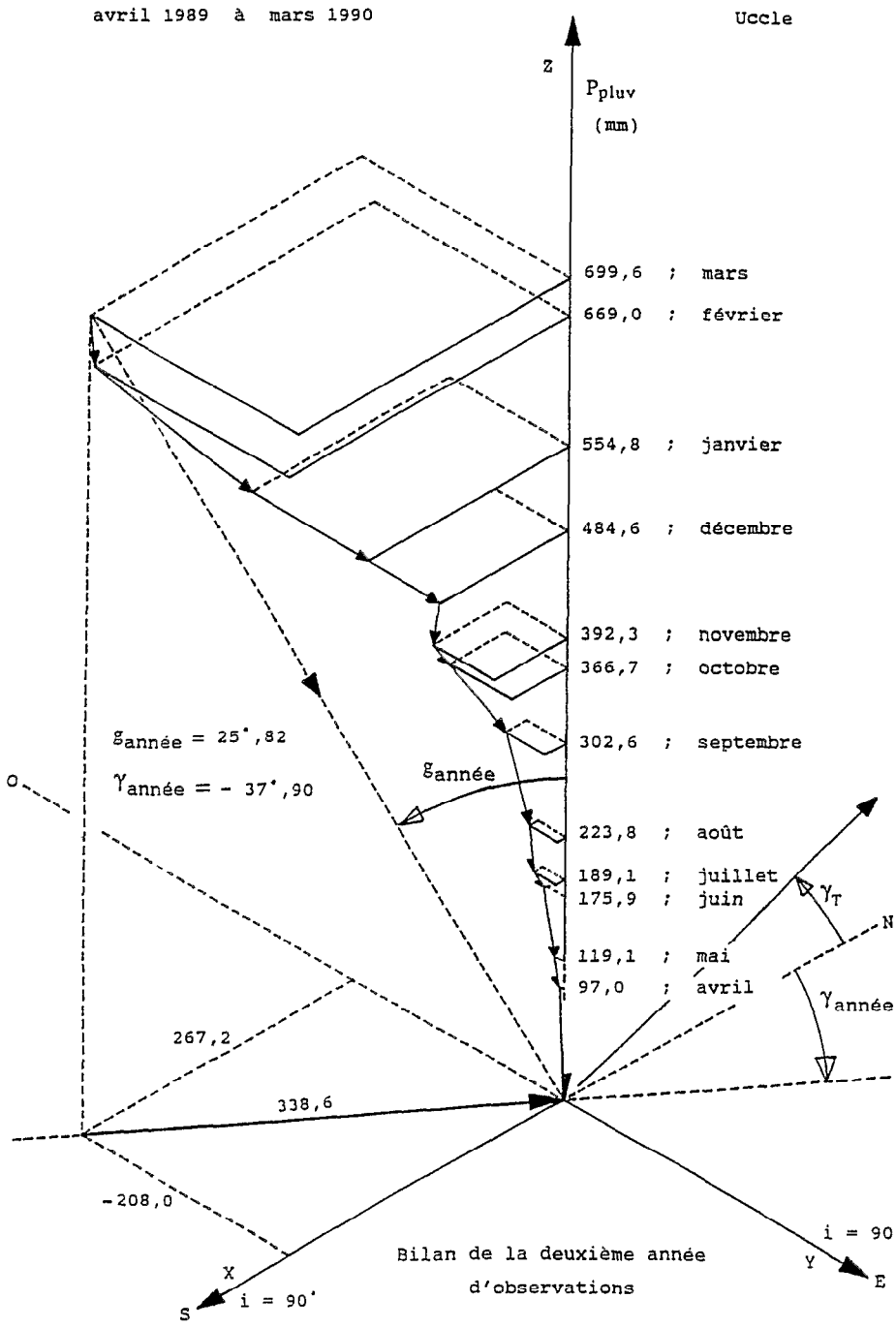

FIG. 9. — Représentation dans l'espace des vecteurs pluies mensuels relatifs à la deuxième année d'observations.

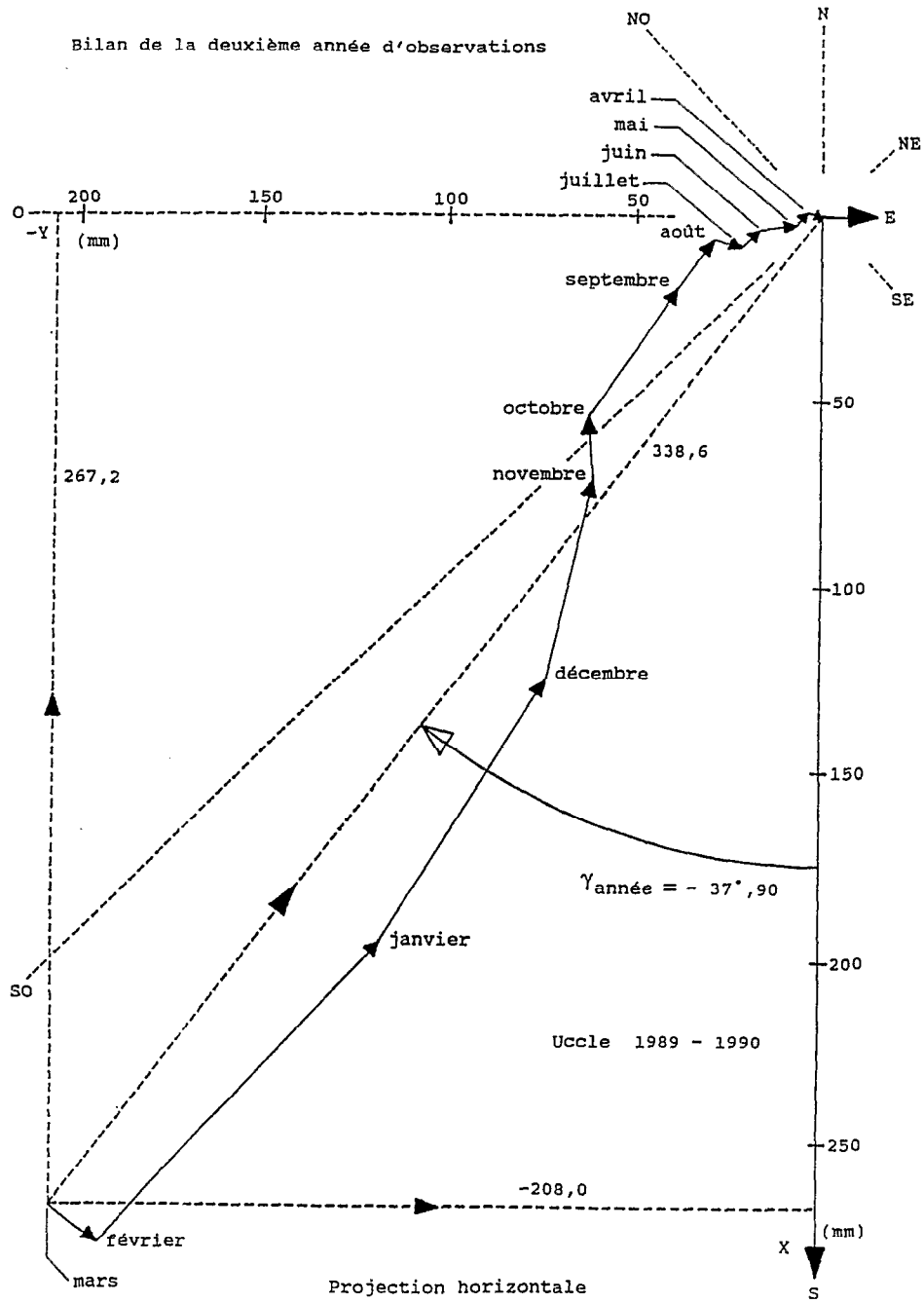

FIG. 10. — Représentation de la composante horizontale des vecteurs pluies mensuels relatifs à la deuxième année d'observations.

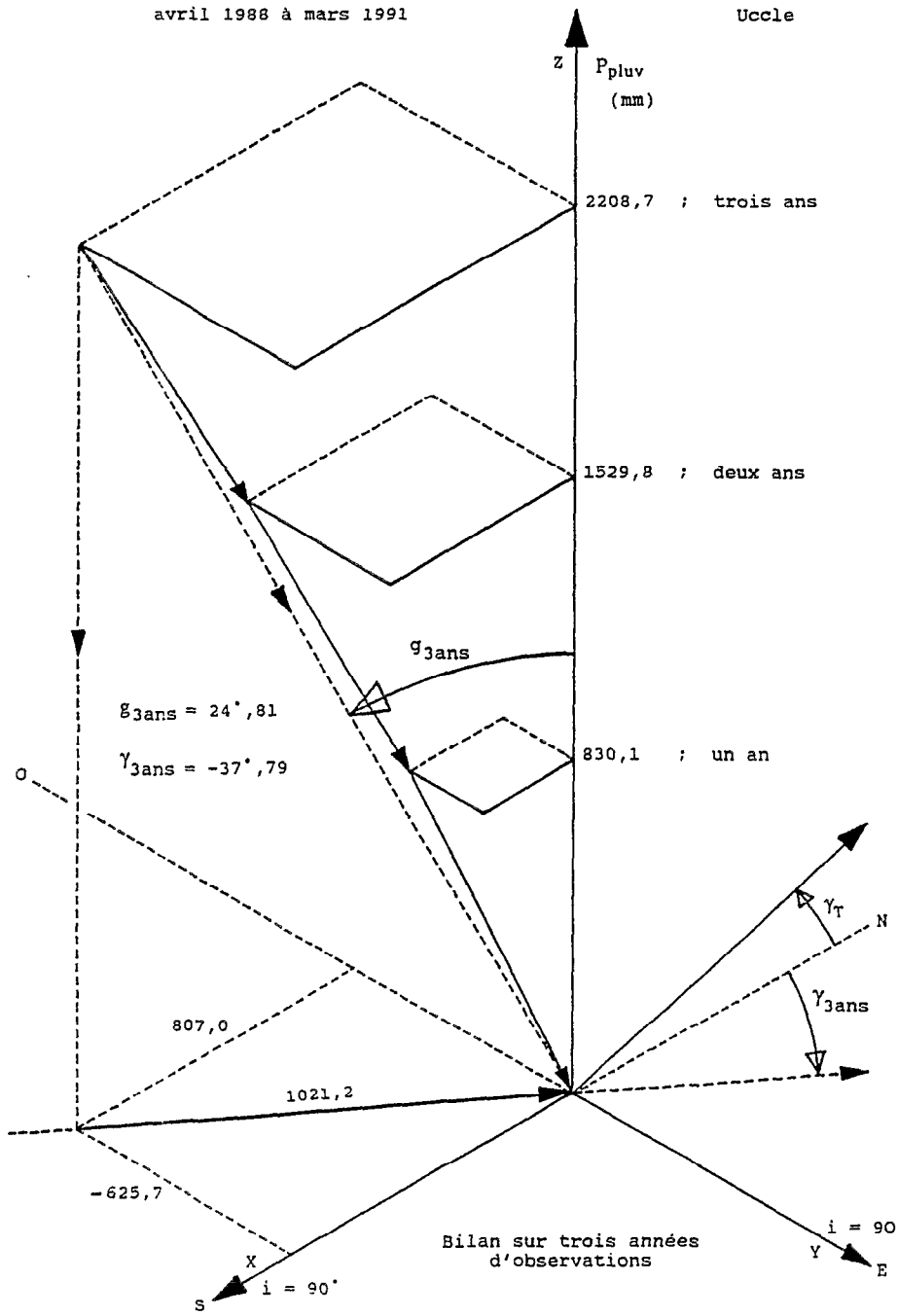

FIG. 11. — Représentation dans l'espace des vecteurs pluies annuels relatifs aux trois années d'observations.

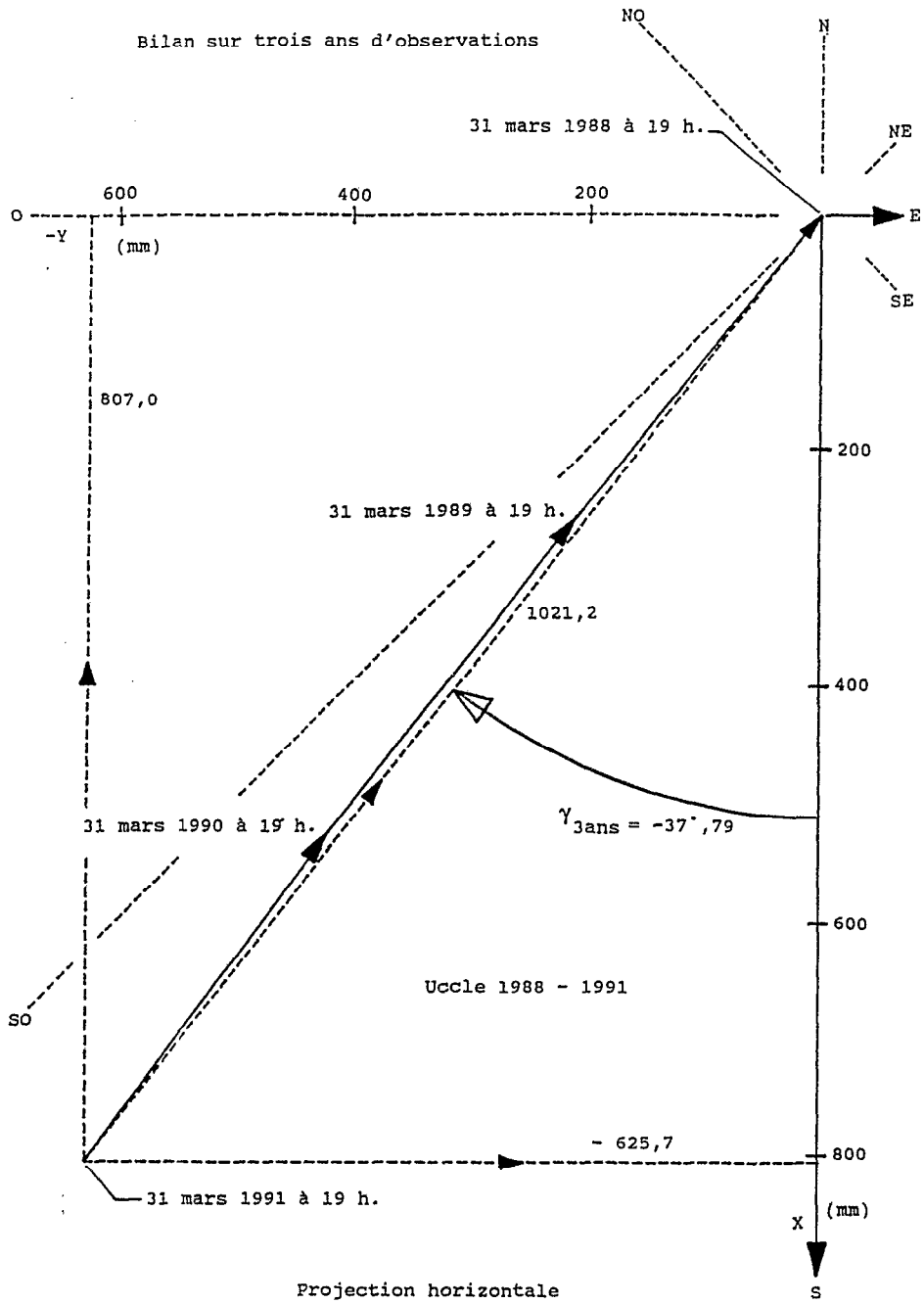

FIG. 12. — Représentation de la composante horizontale des vecteurs pluies annuels relatifs aux trois années d'observations.

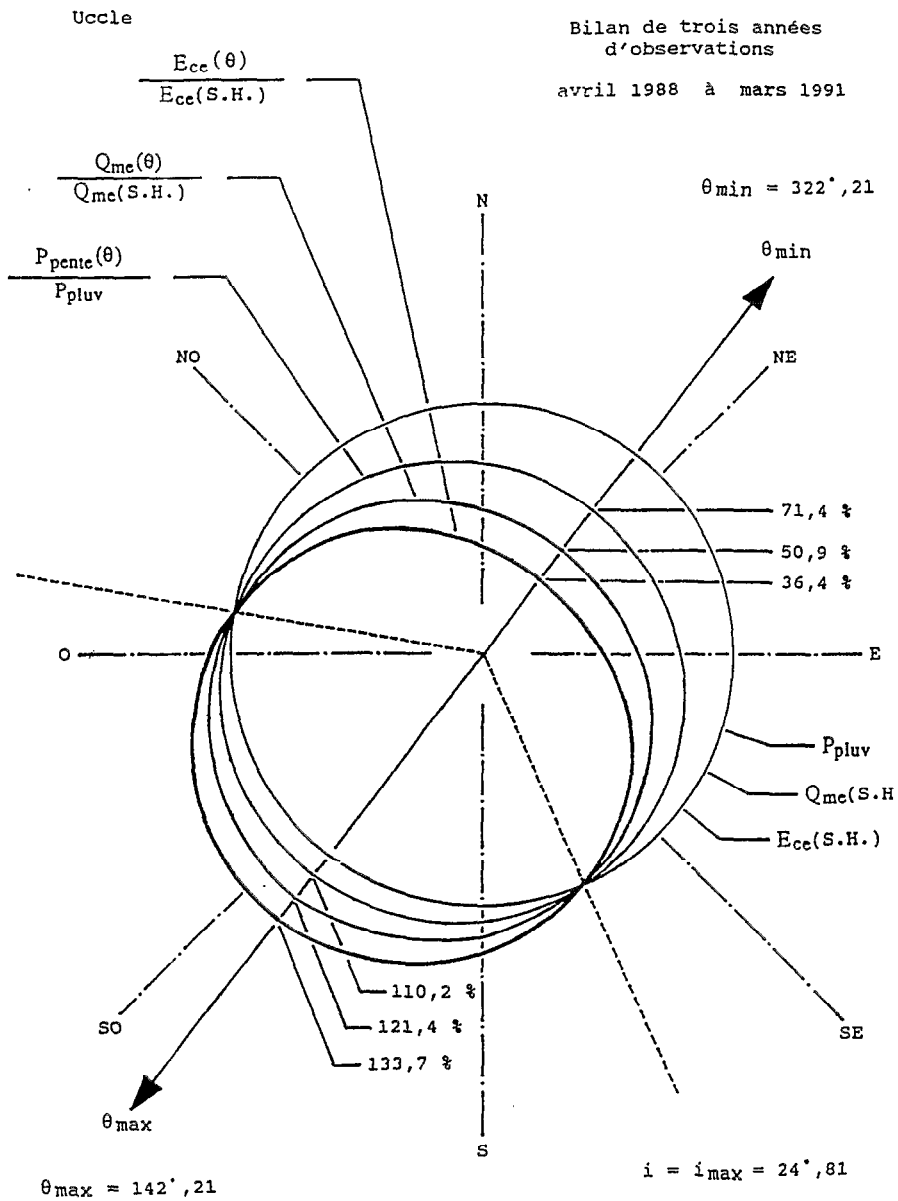

FIG. 13. — Pluviosité, quantité de mouvement érosive d'impact et énergie cinétique érosive d'impact en fonction de l'orientation par rapport à une surface horizontale (SH).

Dès lors il serait intéressant de disposer d'un montage topopluviométrique dans la plupart voire dans toutes les stations climatologiques, à la place ou en complément du pluviomètre classique et ceci d'autant plus que ce montage, fournissant la direction du « vent résultant » pendant la pluie, complèterait l'information des girouettes ou la comblerait partiellement en cas d'absence de celles-ci.

Cependant, il va de soi que l'utilisation d'une technologie sophistiquée, constituée de montages topopluviométriques enregistrant en continu complétés d'anémomètres enregistrant en continu, rendrait accessible une analyse plus

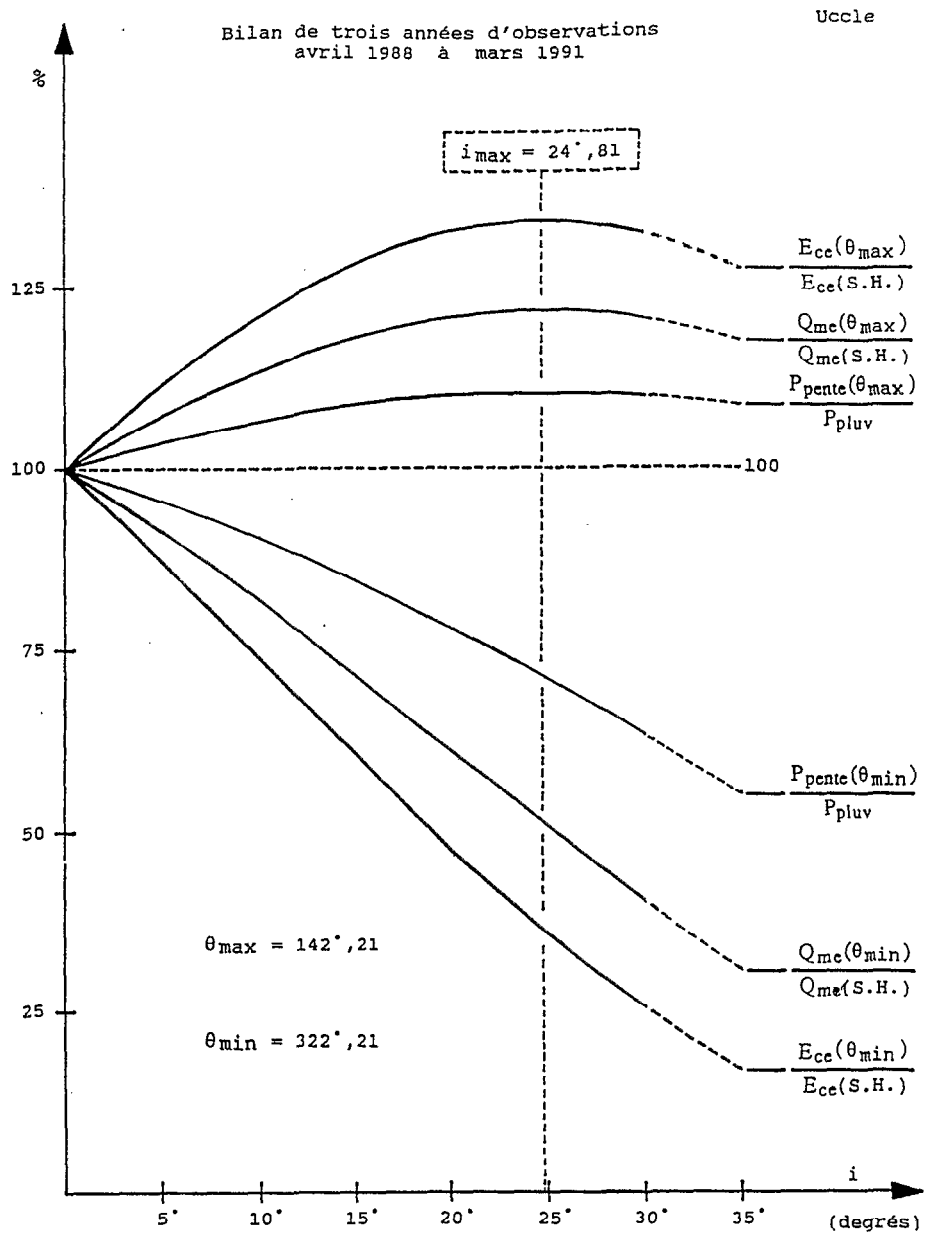

FIG. 14. — Pluviosité, quantité de mouvement érosive d'impact et énergie cinétique érosive d'impact en fonction de l'inclinaison pour l'orientation à maximum de pluviosité c'est-à-dire face au vent et son opposée à minimum de pluviosité par rapport à une surface horizontale (SH).

fine du phénomène pluie, de ses relations avec le topoclimat et permettrait entre autres de déterminer des valeurs instantanées comme la « vitesse moyenne » de chute des gouttes de pluie, leur inclinaison et des grandeurs telles que le vecteur quantité de mouvement moyen mensuel et moyen annuel de la pluie, etc., relatifs aux endroits de mesure.

L'auteur envisage de poursuivre ultérieurement de telles études dans ce sens.

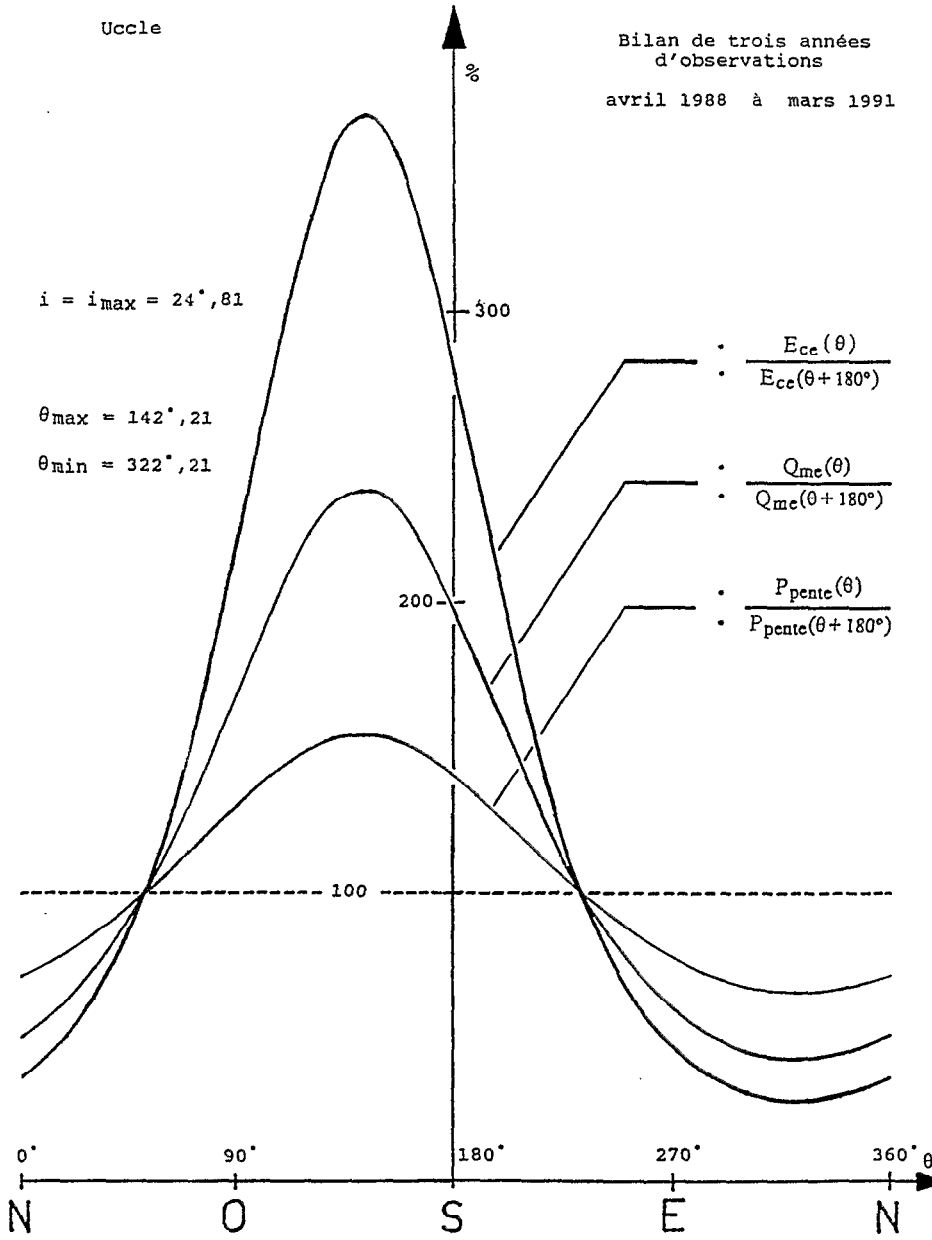

FIG. 15. — Comparaison en fonction de l'orientation de la pluviosité, de la quantité de mouvement érosive d'impact et de l'énergie cinétique érosive d'impact d'un versant et de son opposé.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le laboratoire de Génie rural de la faculté des sciences agronomiques de l'université catholique de Louvain, dans le cadre duquel cette modélisation a été réalisée, et particulièrement les professeurs E. PERSOONS et L. DE BACKER pour leurs précieux conseils et leur soutien.

L'auteur remercie aussi vivement le professeur P. MELCHIOR, directeur de l'observatoire royal de Belgique, qui a permis l'installation d'un montage topopluviométrique dans son établissement et ce pendant plus de trois ans.

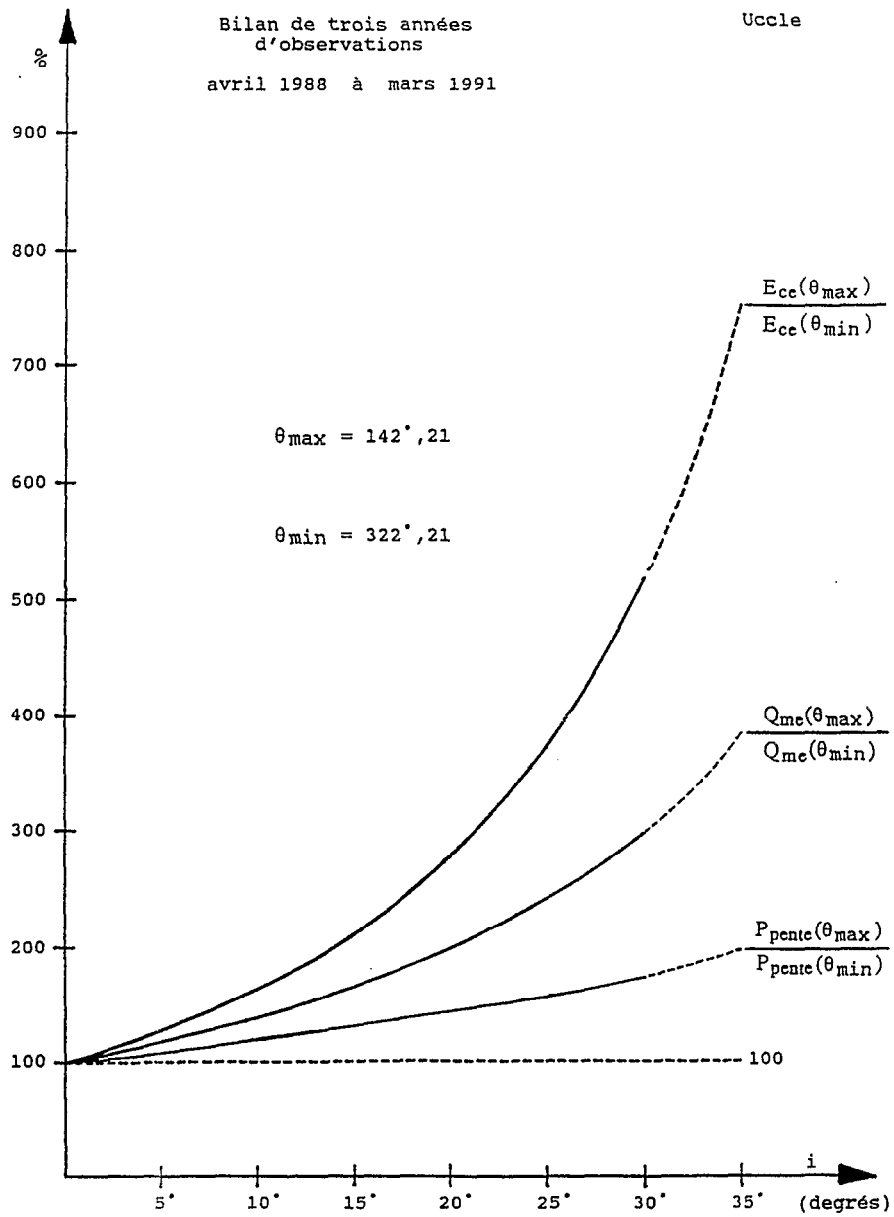

FIG. 16. — Comparaison en fonction de l'inclinaison de la pluviosité, de la quantité de mouvement érosive d'impact et de l'énergie cinétique érosive d'impact du versant à maximum de pluviosité, c'est-à-dire face au vent, et de son opposé à minimum de pluviosité.

LISTE DES SYMBOLES ET LEUR SIGNIFICATION

D'une manière générale, soit A une grandeur quelconque de ce travail, alors :

$\underset{\sim}{A}$ = vecteur A

$\underset{\sim}{A}$ = norme du vecteur $\underset{\sim}{A}$

$\underset{\sim}{A}$ = vecteur normé

$\underset{\sim}{A}(t)$	=	valeur de A l'instant t
$\dot{A}(t)$	=	dérivée de A par rapport au temps à l'instant t
A_T	=	grandeur A relative à la période T
$A_{\Delta t}$	=	grandeur A relative à l'intervalle de temps Δt
A_x, A_y, A_z	=	composantes du vecteur A suivant les axes X, Y, Z respectivement
$A_\perp$	=	composante du vecteur A perpendiculaire à la pente considérée
Δt	=	intervalle de temps
δt	=	intervalle de temps tendant vers zéro
ΔA	=	$A(t + \Delta t) - A(t)$
δA	=	$A(t + \delta t) - A(t)$

de plus, en particulier :

$\underset{\sim}{\hat{u}}_x$, $\underset{\sim}{\hat{u}}_y$, $\underset{\sim}{\hat{u}}_z$	=	vecteurs normés relatifs au trièdre de référence x, y, z respectivement
$\underset{\sim}{\hat{u}}_n$	=	vecteur normé, perpendiculaire à la pente considérée et dont la composante suivant l'axe des z est positive
m_j et $\underset{\sim}{v}_j$	=	masse (kg) et vecteur vitesse (m/s) respectivement de la jième goutte de la pluie réelle traversant une surface unitaire perpendiculaire à $\underset{\sim}{\hat{u}}_{g,T}$
m_i et $\underset{\sim}{v}_i$	=	masse (kg) et vecteur vitesse (m/s) respectivement de la iième goutte de la pluie réelle traversant une surface unitaire horizontale
m	=	masse d'une goutte de la « pluie équivalente » (kg)
$\underset{\sim}{v}_g$	=	vecteur vitesse d'une goutte de la « pluie équivalente » (m/s)
$\underset{\sim}{\hat{u}}_g$	=	vecteur normé de même direction et de même sens que le vecteur vitesse des gouttes de la « pluie équivalente »
v_{vg}	=	composante verticale du vecteur vitesse des gouttes de la « pluie équivalente » (m/s)
i	=	inclinaison (°) de la pente étudiée
i_{max}	=	inclinaison (°) à maximum de pluviosité pour l'orientation à maximum de pluviosité
θ	=	orientation (°) de la pente étudiée
θ_{max} et θ_{min}	=	orientation (°) à maximum et minimum de pluviosité respectivement
g	=	angle (°) que font les gouttes de la « pluie équivalente » avec la verticale
γ	=	direction (°) où va le vent issu du modèle
α	=	angle (°) entre la direction de chute des gouttes de la « pluie équivalente » et la direction de la normale à la pente étudiée
P_{pente}, P_{pluv} et P_r	=	hauteur d'eau tombant pendant la période T sur respectivement une pente, une surface horizontale et une surface perpendiculaire à la direction de chute des gouttes de la pluie équivalente relative à cette même période T (millimètres, litres par mètre carré ou kg par mètre carré)
$P_{pente}(t)$, $P_{pluv}(t)$ et $P_r(t)$	=	idem avec T = [0, t]
$\dot{P}_{pente}(t)$, $\dot{P}_{pluv}(t)$ et $\dot{P}_r(t)$	=	à l'instant t : hauteur d'eau tombant par unité de temps, c-à-d débit de pluie tombant par unité de surface, sur respectivement une pente, une surface horizontale et une surface perpendiculaire à la direction de chute des gouttes de la pluie équivalente relative à ce même instant t (millimètres par unité de temps, litres par mètre carré et par unité de temps ou kg par mètre carré et par unité de temps)
$\underset{\sim}{v}_{vent}$	=	vecteur vitesse du vent issu de la modélisation (m/s)
$\underset{\sim}{Q}_{mvt}$	=	vecteur quantité de mouvement de l'épisode pluviométrique étudié (kg.m/s)

Q_{me}	=	quantité de mouvement érosive de l'épisode pluviométrique étudié relative au versant considéré (kg.m/s)
E_{ce}	=	énergie cinétique érosive de l'épisode pluviométrique étudié relative au versant considéré (N.m)
W(t)	=	puissance instantanée d'une pluie passant à travers une surface unitaire perpendiculaire à la direction de chute des gouttes de la pluie équivalente (N.m/s)
$W_e(t)$	=	puissance érosive de la pluie à l'instant t relative au versant considéré (N.m/s)
S.H.	=	surface horizontale
séc	=	1 / cos
coséc	=	1 / sin

BIBLIOGRAPHIE

BRAZIER (C.E.), 1927. — *Sur la mesure correcte de la pluie.* Mémoires et notes, La Météorologie, tome 3 : 385-395.

BODEUX (A.), 1988. — La vitesse et la direction du vent en Belgique. Institut royal météorologique de Belgique. *Miscellanea*, série B, n° 42, 171 p.

BULTOT (F.), COPPENS (A.), 1985. — Puissance d'une averse. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 30, n° 3 : 361-369.

CHOMICZ (K.), 1965. — Problem of location of precipitation stations in a mountainous region. *Publication de l'Association internationale d'hydrologie scientifique*, n° 68 : 727-735.

DUPRIEZ (G.L.), SNEYERS (R.), 1979. — Les nouvelles cartes pluviométriques de la Belgique. Institut royal météorologique de Belgique. *Publications*, Série A, n° 103, 17 p.

KOVAL (A.), DESSINOV (L.), 1988. — *De Spoutnik à la Station MIR — 30 ans d'observation de la terre*, 285 p.

HARRANG (C.), 1970. — La mesure des précipitations. *Monographie de la Météorologie nationale*, n° 78, 78 p.

LACY (R.E.), 1951. — Observations with a directional rain-gauge. Quart. *Journal of the Royal Meterological Society* : 283-292.

MALET (L.M.), 1989. — Le vent dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère. Généralités, structure verticale, énergie. Pourquoi et comment déterminer le vent standard de surface ? Institut royal météorologique de Belgique. *Publications* série A, n° 119/2, 50 p.

MEERT (E.), VAN ACKERE (G.), 1978. — L'étanchéité au vent et à la pluie des façades. *CSTC*, Revue n° 2 : 31-41.

MEERT (E.), VAN ACKERE (G.), 1976. — Vent et pluie en façade. Essais et exécution des châssis. *CSTC*, revue n° 4 : 27-50.

SNEYERS (R.), MEERT (E.), SOUBRIER (D.), VAN ACKERE (G.), 1979. — Intensité de la pluie battante et la pression du vent sur les façades. Calculs basés sur les mesures de la pluie et du vent à l'air libre. *CSTC*, revue n° 2 : 22-37.

SNEYERS (R.), 1989. — Intensité de la pluie battante et pression du vent : données générales et données particulières à la Belgique. Institut royal météorologique de Belgique. *Publications* série A, n° 119/11, 18 p.

St GEORGES (M.), BUCHLIN (M.), RIETHMULLER (M.L.), LOPEZ (G.P.), LIETO (J.), GRIOLET (F.), 1991. — *Fundamental multidisciplinary study of liquid sprays for absorption of pollutant or toxic clouds.* Preprint 1992, 03/EA, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 15 p.

TESTA (G.), 1987. — Recommandations pour l'implantation de pluviomètres en milieu urbain. *Note technique du service des équipements et des techniques instrumentales de la météorologie*, n° 12. Direction de la Météorologie nationale, 6 p.

VAN HAMME (T.), 1992. — *La pluie en tant que facteur topoclimatique.* Travail de recherche scientifique effectué en qualité de chercheur libre à l'Unité de Génie rural de l'UCL durant la période 1987-1991 (non publié), 200 p.