

ETUDE DES CONSEQUENCES DE L'ACCIDENT DE WINDSCALE (Octobre 1957)  
ET DE LA VALIDITE DU MODELE MATHEMATIQUE DE DIFFUSION ATMOSPHERIQUE  
DE SUTTON (1960).

Sommaire. - L'accident survenu à la pile n° 1 de Windscale en 1957 a entraîné l'émission de matières radioactives dans l'atmosphère du 10 octobre à 16 h 30 au 12 octobre à 15 h 10. Le 11 octobre, on pouvait dire qu'il n'y avait plus de risque d'irradiation externe ni de danger par inhalation. Mais en adoptant une C.M.A. de 0,1  $\mu$ curie d'iode 131 par litre de lait, les autorités ont dû réglementer la consommation du lait jusqu'au 23 novembre sur une étendue d'environ 500  $\text{km}^2$ .

D'autre part, cet accident exceptionnel a permis de vérifier que le modèle de diffusion atmosphérique de Sutton pouvait fournir un moyen commode de prévoir avec une approximation suffisant les conséquences d'une dispersion de produits radioactifs dans l'atmosphère.

CEA - 1538 - MARTIN J.J., DOURY A.

CONSEQUENCES OF WINDSCALE'S ACCIDENT (Octobre 1957) AND STUDY  
OF THE VALIDITY OF THE SUTTON'S MATHEMATICAL MODEL OF ATMOSPHERIC  
DIFFUSION (1960).

Summary. - The reactor accident that happens at the n° 1 pile of Windscale in 1957 was followed by a discharge of radioactive products into the atmosphere from the 1.X.1957 at 4.30 PM to the 12.I.1957 at 3.10 PM. On october the 11th it was possible to say that there was no more risk either of external irradiation or inhalation. But if adopting a M.A.C. of 0,1  $\mu$ curie of iodine 131 per litre of milk, the Authority had to control the milk delivery till november 23 rd on a 500  $\text{km}^2$  area.

On the other hand, this exceptionnal accident permit to verify that Sutton's atmospheric diffusion model could give an easy means to foresee, with a sufficient approximation, the consequences of a dispersion of radioactive products into the atmosphere.

- Rapport C.E.A. n° 1538 -

**ETUDE DES CONSEQUENCES  
DE L'ACCIDENT DE WINDSCALE (OCTOBRE 1957)  
ET DE LA VALIDITE DU MODELE MATHEMATIQUE  
DE DIFFUSION ATMOSPHERIQUE DE SUTTON**

par

J. J. MARTIN  
Ingénieur  
à l'Electricité de France  
(S.L.P.R. CHINON)

et

A. DOURY  
Ingénieur  
au Commissariat à l'Energie Atomique  
(S.C.R.G.R.)

2. 60-123

PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT A  
L'ENERGIE ATOMIQUE

**ETUDE DES CONSEQUENCES  
DE L'ACCIDENT DE WINDSCALE (OCTOBRE 1957)  
ET DE LA VALIDITE DU MODELE MATHEMATIQUE  
DE DIFFUSION ATMOSPHERIQUE DE SUTTON**

par

**J. J. MARTIN**

Ingénieur

à l'Electricité de France  
(S.L.P.R. CHINON)

et

**A. DOURY**

Ingénieur

au Commissariat à l'Energie Atomique  
(S.C.R.G.R.)

**Rapport CEA N° 1538**

**1960**

CENTRE D'ÉTUDES  
NUCLÉAIRES DE SACLAY  
SERVICE DE DOCUMENTATION  
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)

**ETUDE DES CONSEQUENCES  
DE L'ACCIDENT DE WINDSCALE (OCTOBRE 1957)  
ET DE LA VALIDITE DU MODELE MATHEMATIQUE  
DE DIFFUSION ATMOSPHERIQUE DE SUTTON**

**S O M M A I R E**

- I - Circonstances de l'accident.**
- II - Irradiation et contamination lors de l'accident :**
  - 1<sup>o</sup> / Irradiation.**
  - 2<sup>o</sup> / Contamination :**
    - a/ par l'Iode,**
    - b/ par les produits de fission solides.**
  - 3<sup>o</sup> / Conclusion.**
- III - Détermination des quantités de produits radio-actifs relâchés dans l'atmosphère.**
- IV - Concentration et dépôts en Iode 131.**
- V - Conditions météorologiques.**
- VI - Comparaison des valeurs observées, et des valeurs calculées d'après la théorie de Sutton :**
  - 1<sup>o</sup> / Etude des concentrations intégrées.**
  - 2<sup>o</sup> / Etude du dépôt sur le sol.**
  - 3<sup>o</sup> / Vitesse de dépôt.**
- VII - Conclusion.**

## INTRODUCTION

L'accident survenu à la pile n° 1 de WINDSCALE (Grande-Bretagne) en Octobre 1957 a eu essentiellement pour conséquence, la libération dans l'atmosphère d'une quantité assez importante de gaz et d'aérosols radioactifs.

Pour regrettable qu'ait été cet accident, il n'en constitue pas moins une occasion exceptionnelle d'étude expérimentale et en vraie grandeur des propriétés de diffusion de l'atmosphère sur des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.

C'est ainsi que M. DUHAMEL, Chef du Service du Contrôle des Radiations et du Génie Radioactif, nous a demandé de vérifier, à partir des éléments disponibles concernant les conditions du rejet, l'importance du rejet, les mesures de concentration dans l'air et de dépôt sur le sol

de produits radioactifs, ainsi que les conditions météorologiques, dans quelle mesure et avec quelle précision la méthode d'évaluation théorique que nous avions précédemment utilisée nous aurait permis de prévoir les ordres de grandeur des conséquences connues de l'accident de WINDSCALE.

C'est ce travail que nous présentons ici, et au préalable, nous tenons à préciser que notre méthode d'évaluation théorique utilise le modèle de diffusion atmosphérique de Sutton, mais avec le maximum de simplification afin d'en rendre l'emploi plus commode.

Nous avons choisi une situation météorologique-type représentant le mieux possible en moyenne la situation réelle et nous en avons déduit pour chaque paramètre une seule valeur numérique que nous avons conservée dans tout l'espace et pendant toute la durée de la dispersion.

## I - CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT [1]

L'accident a eu lieu lors d'une opération courante de libération d'énergie Wigner. Les points susceptibles de donner la plus forte libération d'énergie, donc la plus forte élévation de température, sont ceux qui sont portés à moins haute température en marche normale; il en résulte qu'ils ne sont pas équipés d'un nombre suffisant de thermocouples et cette circonstance explique que les points chauds n'ont pas été détectés assez tôt et que la combustion a pu s'étendre sans contrôle initial.

La pile de WINDSCALE 1 avait été arrêtée le 7 octobre à 1 h. 13. Elle divergea vers 19 h. 25 pour être arrêtée

tée de bonne heure le 8 Octobre et diverger à nouveau à 11 h. 05. On estime que la combustion des barreaux a débuté le 9 Octobre et qu'elle s'étendait à 150 canaux le soir du jeudi 10. Une inspection visuelle à 16 h. 30 a permis de voir les cartouches en feu. Dès 5 h. 40, on notait un accroissement brusque de l'activité de la chambre située près du filtre à la sortie de la cheminée. À 8 h. 10, à nouveau, l'activité présentait des pointes nettes en relation avec l'ouverture des papillons des soufflantes. De même, on notait une forte activité sur le toit de la station météorologique. Le 11 Octobre, on commençait à employer l'eau à 8 h. 55.

On estime [1] que l'émission de matières radioactives a duré du 10 Octobre à 16 h. 30 au 12 Octobre à 15 h. 10.

## II - IRRADIATION ET CONTAMINATION LORS DE L'ACCIDENT.

### 1° - Irradiation.

Au voisinage immédiat de la pile, on a observé une irradiation de 2 LMA le 10 Octobre à 14 h.; elle atteignait 5 à 10 LMA durant la nuit avec quelques pointes à 150 LMA, et retombait à 1 ou 2 LMA le 11 Octobre à 12 h. [1].

L'intensité mesurée par les stations mobiles était de 150 à 200  $\mu$ R/h avec des pointes de 4 mR/h, soit environ 400 fois le fond naturel de 10  $\mu$ R/h [5].

L'exposition intégrée a été de 10 à 20 mR pour la population (limite indiquée 500 mR). Chez les travailleurs, les films ont donné une dose intégrée maximum de 4,66 R sur 13 semaines, dont on estime que 4,5 R ont été pris pendant l'accident [1]. On se trouve donc un peu au-dessus de la norme des 3 R pris en une seule irradiation.

ou en 13 semaines.

2° - Contamination.

Elle a surtout été due à l'Iode 131, mais les analyses d'herbe ont aussi montré l'existence de Strontium, Ruthénium, Coesium et Baryum.

a) Contamination par l'Iode.

Les premiers prélèvements de lait ont été faits le 11 Octobre au matin et donnaient 0,005  $\mu\text{c}/\text{l}$  en  $\text{I}^{131}$ ; dès la traite de l'après-midi, on atteignait 0,8  $\mu\text{c}/\text{litre}$  [5]. Le maximum a été de 1,4  $\mu\text{c}/\text{litre}$  à 16 km de Windscale [5]. Il faut noter que la concentration de l'Iode dans le lait de vaches d'un même troupeau peut varier de façon importante; on a eu ainsi des valeurs extrêmes de 0,028 et 0,113  $\mu\text{c}/\text{l}$ . On a fait environ 3.000 analyses portant sur des échantillons de l'ordre d'un quart de litre.

Il fallait dès lors, à partir de ces chiffres d'analyse, délimiter les zones contaminées. Malheureusement, on ne disposait pas de base reconnue en ce qui concerne la concentration maximale admissible de l' $\text{I}^{131}$  dans le lait. On connaît seulement la CMA dans l'eau de  $6 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^3$ , dans l'air de  $6 \cdot 10^{-9} \text{ C/m}^3$  et le maximum admissible dans la thyroïde de 0,6  $\mu\text{c}$  [11]. Une recommandation du Dr Scott-Russel donnait une limite de 0,39  $\mu\text{c}/\text{litre}$  de lait.

Plusieurs méthodes de calcul furent employées pour fixer une limite [5]. Les enfants étant les

plus gros consommateurs de lait, on a adopté pour eux une dose intégrée maximum de 20 rads. Avec une dose intégrée par gramme de thyroïde de 130 rads pour 1  $\mu$ c d'I<sup>131</sup>, et, soit un poids de thyroïde de 5 g et une retenue de 45 %, soit 1,5 g et 20 %, on a respectivement des doses intégrées de 26 et de 86 rads. Pour obtenir le maximum de 20 rads, un enfant consommant 1 litre de lait par jour et la période biologique de l'Iode 131 étant de 11,5 jours, on arrive aux limites :

$$\frac{20}{26} \cdot \frac{100}{45} \cdot \frac{1}{11,5} = 0,15 \mu\text{c/l.}$$

$$\text{et } \frac{20}{86} \cdot \frac{100}{20} \cdot \frac{1}{11,5} = 0,1 \mu\text{c/l.}$$

On a adopté la C.M.A. de 0,1  $\mu$ c/litre. Cette limite amenait à étendre le contrôle du lait sur environ 500 km<sup>2</sup>.

Plusieurs chiffres ont été donnés pour la quantité d'Iode fixée par la thyroïde et observée : 0,1  $\mu$ c dans la thyroïde des adultes de la population avoisinante, au plus 0,5  $\mu$ c chez le personnel, et un maximum chez les enfants de 0,28  $\mu$ c [1]. Une autre quantité extrême de 0,50  $\mu$ c chez trois enfants aurait été trouvée le 11 Octobre à 10 km au SE de Windscale [5]. Un contrôle effectué sur 28 enfants a permis de trouver chez l'un d'eux, dont on est convaincu qu'il a consommé du lait du district interdit, une dose calculée de l'ordre de 16 rad [1]. On reste donc en dessous de la norme fixée de 20 rads.

On a calculé, à partir de la quantité de lait produite par une vache, de la superficie d'herbe broutée et des différents coefficients de rétention,

l'équivalent en dépôt sur le sol de 0,1  $\mu\text{c}$  par litre de lait. Les auteurs s'accordent pour donner l'équivalence :  $0,1 \mu\text{c/l} = 1 \mu\text{c/m}^2$  [5] [7] [8] .

Dans ces conditions, on a déterminé que l'irradiation  $\gamma$  due au dépôt d'I<sup>131</sup> était de 7,7  $\mu\text{rad/h}$  à 1 pied du sol, valeur de l'ordre de l'activité naturelle [8] .

La valeur adoptée de  $10^{-6} \text{ C/m}^2$  de dépôt d'I<sup>131</sup> est très inférieure à celle indiquée par Kuper et Gowan [9] [10] :  $10^{-4} \text{ C/m}^2$  comme limite de la zone de surveillance du lait dans le cas d'un accident nucléaire. Il convient de remarquer que cette dernière limite est un compromis entre le danger réel dû à l'Iode 131 et l'étendue de l'accident.

b) Contamination par les produits de fission solides

On a déterminé à Calder et Harrow les activités relatives à l'Iode de divers produits de fission déposés soit sur des filtres, soit sur l'herbe [6] [7] , (Voir tableau page suivante).

On voit que l'activité des produits solides, en pourcentage de l'activité de l'Iode, est plus élevée sur les filtres que sur l'herbe, les filtres ayant une efficacité assez faible vis-à-vis de l'Iode (1 % pour les filtres anglais en papier Whatman). Des problèmes de granulométrie rendent l'utilisation des filtres très délicate. On a remarqué, par exemple, qu'une partie de l'Iode s'est fixée sur l'oxyde de Bismuth rejeté, ou sur des noyaux de condensation; ceci a été vérifié par analyse microscopique d'autoradiographies [12] .

Iso- topes	Pério- de	Calder 11 Octobre			Harrow 11 Oct.	
		Filtre	Herbe			
			3,2 Km SW	6,4 Km SW		
I <sup>131</sup>	8 j	100 (10 <sup>-6</sup> C/m <sup>3</sup> )	100 (0,16 μC/g)	100 (0,04 μC/g)	100	
Te <sup>132</sup>	77 h				85	
I <sup>132</sup>	2-3 h				85	
Cs <sup>137</sup>	30 a	2,6	1,2	2,0	11	
Ru <sup>103</sup>	40 j	3,8	1,5	1,7	7	
Po <sup>210</sup>	135 j				2-6	
Sr <sup>89</sup>	54 j	1,0	0,2	0,2	0-8	
Sr <sup>90</sup>	28 a	0,02	0,004	0,01	0-04	
Ba <sup>140</sup>		2,5		0,5		
Zr <sup>95</sup>		0,3	0,2	0,3		

3° - Conclusion.

Le 11 Octobre, on pouvait dire qu'il n'y avait pas de risque d'irradiation externe, pas de danger par inhalation, et que le dépôt des produits de fission n'intervenait que par la contamination du lait 5 .

Les restrictions d'utilisation de la zone polluée furent levées le 23 Novembre 1957.

III - DETERMINATION DES QUANTITES DE PRODUITS RADIOACTIFS LACHES DANS L'ATMOSPHERE.

Il est difficile de fixer les quantités de produits de fission relâchés lors de l'accident.

1° - On trouve des estimations basées sur les mesures de contrôle faites dans la campagne, ainsi que sur les prélèvements faits dans les filtres de sortie donnant des quantités de :

20.000 C d'I <sup>131</sup>	80 C de Sr 89
600 C de Cs 137	9 C de Sr 90
	[5]

Ces activités ont dû être corrigées au 7 Octobre, mais cela n'est pas précisé.

2° - Le livre Blanc [1] indique que 150 canaux étaient en feu entre le 9 et le 10 Octobre.

À partir de cette donnée, il est possible de calculer la quantité de produits de fission totaux sus-

ceptibles de se dégager [3], soit, pour un poids de 8.500 Kg d'uranium et une puissance spécifique de l'ordre de 0,5 MW/tonne, l'équivalent d'une puissance de 4 MW.

On estime que le rejet d'Iode a été de 13.500 C, dont l'activité ramenée à la date d'arrêt de la pile (7 Octobre) serait de 19.000 C (chiffre analogue au précédent de 20.000 C). Le rendement de fission de l'I<sup>131</sup> étant de 2,9 %, cette quantité correspond à une puissance de réacteur de :

$$\frac{19.000}{3,1 \cdot 10^{10} \cdot 2,9 \cdot 10^{-2}} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} = 0,8 \text{ MW}$$

Donc, 20 % de l'Iode 131 présent dans l'uranium se serait échappé [3].

Enfin, l'activité des filtres était de l'ordre de 20.000 C le 13 Octobre. Si on adopte la loi de décroissance en  $t^{-0,2}$  pour les produits solides retenus, l'activité des produits fixés correspond à une puissance de fonctionnement corrigée au 7 Octobre de :

$$20.000 \cdot 6^{0,2} \cdot \frac{1}{0,8} = 35 \text{ kW}$$

en adoptant pour les produits de fission une activité de 0,8 C/w après un jour de décroissance [9]. Il en résulte qu'environ 1 % des produits de fission ont été retenus par les filtres [3].

3° - Sur le tableau du paragraphe II 2 b, on a l'activité du Sr 89 et du Sr 90, en pourcentage de l'activité de l'Iode (laquelle est notée en dessous du chiffre 100). Par ailleurs, on trouve [10] l'inventaire des produits de fission d'une pile fonctionnant à 500 MW th après 180 jours de fonctionnement et un jour de décroissance.

Produits totaux de fission	
PFT	$4,1 \cdot 10^8$ Curie
Sr 90	$3 \cdot 10^5$
Sr 89	$1,7 \cdot 10^7$
Ce 144	$8 \cdot 10^6$
Pu 239	$3,8 \cdot 10^3$
Iode	Produits de ( $3 \cdot 10^7$ ) fission volatils PFT ( $8,4 \cdot 10^7$ ) = $0,2$ PFT
Gas nobles	

Après 4 jours de décroissance, il ne reste plus que 1/4 de l'activité initiale de l'Iode, en Iode 131 presque exclusivement, soit :  $1,25 \cdot 10^7$  C. La proportion  $\frac{\text{Sr 89}}{\text{I 131}}$  est donc :

$$\frac{1,7 \cdot 10^7}{1,25 \cdot 10^7} = 1,36$$

Dans les analyses d'herbe de Calder, la proportion est de  $0,2 \cdot 10^{-2}$  ce qui permet d'envisager dans l'hypothèse du rejet de la totalité de l'Iode, que :

$$\frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{1,36} = 0,15 \%$$
 du Sr 89 susceptible d'être rejeté par la pile à traversé les filtres. Sur la base

d'une puissance maximum de 4 MW, on trouverait alors une activité de  $\frac{4}{500} \cdot 1,7 \cdot 10^7 \cdot \frac{0,15}{100} = 200$  C.

La proportion  $\frac{\text{Sr 90}}{\text{I 131}}$  est de  $\frac{3 \cdot 10^5}{1,25 \cdot 10^7} = 2,4 \cdot 10^{-2}$

La proportion dans l'herbe est en moyenne de  $0,007 \cdot 10^{-2}$   
Donc,  $\frac{0,007}{2,4} = 0,3 \%$  du Sr 90 aurait été lâché dans  
l'atmosphère, soit :

$$\frac{4}{500} \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,3}{100} = 7 \text{ C.}$$

Ces chiffres (200 C pour le Sr 89 et 7 C pour le  
Sr 90) sont de l'ordre de grandeur de ceux de 80 C et  
9 C donnés en [5].

Pour le Cs 137, le calcul montre que l'on a :  
 $6 \cdot 10^2 \text{ C/MW.}$

La proportion lâchée dans l'atmosphère est beaucoup  
plus importante. La proportion maximum  $\frac{\text{Cs 137}}{\text{I 131}}$  étant de :

$$\frac{3 \cdot 10^5}{1,25 \cdot 10^7} = 2,4 \cdot 10^{-2},$$

on trouve dans l'herbe une activité relative à l'Iode  
de 1,6 % en moyenne. Donc environ 70 % du Cs 137  
aurait été rejeté. On trouverait alors :

$$4 \cdot 6 \cdot 10^2 \cdot \frac{70}{100} = 1.700 \text{ C.}$$

Cette sélectivité dans le rejet pourrait s'expli-  
quer par une granulométrie différente des éléments  
eux-mêmes ou de leurs supports, ce qui reste à montrer.  
On a remarqué que le rapport  $\frac{\text{Cesium}}{\text{Iode}}$ , sur les filtres,  
croît avec l'éloignement dans la direction E S E [12].  
Pour cette raison, les dépôts mesurés en Cs 137 seront  
difficiles à utiliser.

Ces déterminations sont basées sur l'hypothèse du rejet de tout l'Iode, c'est-à-dire  $4. 2, 5 \cdot 10^4 = 100.000 \text{ C}$  après 1 jour de décroissance, soit environ 100.000 C le 7 Octobre. Les différents chiffres sont rappelés dans le tableau suivant :

	5	Rejet de 4 MW	
Iode 131	20.000 C (20%)	100 %	100.000 C
Cœsium 137	600	70 %	1.700
Strontium 89	80	0,15 %	200
Strontium 90	9	0,3 %	7

Il est difficile de choisir entre ces deux séries de valeurs; en particulier à cause des faibles activités du Sr 89 ( $32 \cdot 10^{-3}$  et  $8 \cdot 10^{-3} \mu\text{c/g}$  d'herbe) et du Sr 90 ( $6,4 \cdot 10^{-4}$  et  $4 \cdot 10^{-4} \mu\text{c/g}$ ) obtenues sur deux analyses seulement. Nous conserverons pour l'instant ce tableau de chiffres en mémoire.

#### IV - CONCENTRATIONS ET DÉPOTS EN IODE 131

Les chiffres donnés pour les Strontium et le Cœsium sont assez fragmentaires et peu utilisables. Par contre, un grand nombre d'analyses ont été effectuées sur l'Iode 131. Nous nous servirons de ces valeurs pour contrôler le modèle mathématique de diffusion de Sutton.

Royaume-Uni

Lancaster	65 Km	$773 \cdot 10^{-12} \text{ C.j / m}^3$
Preston	95	691

<b>Burnley</b>	120 Km	<b>801 C.j /m<sup>3</sup></b>
<b>Liverpool</b>	125	<b>1007</b>
<b>St Helens</b>	125	<b>730</b>
<b>Bolton</b>	130	<b>277</b>
<b>Manchester</b>	145	<b>235</b>
<b>Salford</b>	145	<b>207</b>
<b>Sale</b>	145	<b>194</b>
<b>Bradford</b>	150	<b>402</b>
<b>Leeds</b>	160	<b>369</b>
<b>Batley</b>	180	<b>525</b>
<b>Sheffield</b>	195	<b>585</b>
<b>Warrington</b>	210	<b>462</b>
<b>Cannock</b>	240	<b>390</b>
<b>Nottingham</b>	245	<b>496</b>
<b>Numcaton</b>	280	<b>292</b>
<b>Leicester</b>	285	<b>383</b>
<b>Cardington</b>	350	<b>354</b>
<b>Cardiff</b>	360	<b>134</b>
<b>Oxford</b>	370	<b>250</b>
<b>Harwell</b>	390	<b>185</b>
<b>Londres</b>	430	<b>425</b>
<b>Southampton</b>	450	<b>277</b>
<b>Portsmouth</b>	480	<b>298</b>
<b>Exeter</b>	470	<b>145</b>

**Norvège**

<b>Sola</b>	<b>1,9</b>
-------------	------------

**Hollande**

<b>Eindhoven</b>	700	<b><math>31,3 \cdot 10^{-12}</math></b>
<b>Le Helder</b>		<b>15,1</b>
<b>De Bilt</b>		<b>10,1</b>

**Allemagne**

<b>Hanovre</b>	900	<b>8,8</b>
<b>Essen</b>		<b>14,9</b>
<b>Emden</b>		<b>6,5</b>
<b>Aix-la-Chapelle</b>		<b>35</b>
<b>Stuttgart</b>		<b>0,4</b>
<b>Munich</b>		<b>0</b>
<b>Potsdam</b>		<b>2,7</b>

**Suède**

<b>Stockholm</b>	<b>1,0</b>
------------------	------------

**Suisse**

<b>Payerne</b>	<b>0,4</b>
----------------	------------

**Autriche**

<b>Vienne</b>	<b>1,0</b>
---------------	------------

**France**

<b>Saclay et Val Joyeux</b>	<b>2,7</b>
-----------------------------	------------

En Belgique, on relevait  $48,7 \cdot 10^{-12}$  C. j/m<sup>3</sup> à UCCLE et 30 à MOL.

On trouve, par ailleurs, la carte des dépôts de l'I 131 sur l'herbe le 11 Octobre 1957 en  $\mu$ C/m<sup>2</sup> [7] ainsi que des dépôts de Cs 137, Ru 103 et 106 et Zr 95 [5]. Si on représente le dépôt d'I 131 dans l'azimut 145° de Windscale (fig. 1), on voit un maximum à 6 km, et un autre à 22 km. dû au relief de la montagne Black Combe (450 m) [7].

## V - CONDITIONS METEOROLOGIQUES.

Il n'a pas été possible, malheureusement, de réunir les cartes d'observations trihoraires pointées sur le domaine France - Benelux - Iles Britanniques et Allemagne. Etant donné la variabilité du vent les 10 et 11 Octobre, il aurait fallu de nombreuses observations pour pouvoir tracer la trajectoire du nuage.

La direction et la force du vent ont été mesurées à 152 mètres au-dessus de Windscale. Après une période de vents calmes, la direction est temporairement Sud-Ouest à 10 h le 11, puis tourne au Nord après le passage d'un front froid vers 02 h à Windscale (13 h 30 à Londres), avant de prendre une direction Nord-Ouest, force 12 noeuds jusqu'au 12 à 00 h. L'air postérieur au front froid est instable jusqu'à 1200 m environ, mais devient stable dans la soirée du 11 en liaison avec le passage sur l'Angleterre d'une cellule anticyclonique. Le front froid précède d'environ trois heures l'arrivée du nuage, lequel arrive à 09 h le 11 à Leed et Bradford, à 16 h le 11 à Harrow, à 19 h le 11 à Mole (Belgique), à 22 h le 12 à Francfort et le 15 Octobre à Sola. Le front froid devient inactif sur les côtes de la Manche le 12 à 06 h et l'air froid se mélange avec l'air antérieur, ce qui explique la faible concentration observée à Paris. Par contre, les masses d'air sont assez différenciées sur l'Allemagne, que l'air froid envahit le 13, en même temps que le Nord de l'Europe.

Les précipitations ont été généralement négligeables.

## VI - COMPARAISON DES VALEURS OBSERVEES, ET DES VALEURS CALCULEES D'APRES LA THEORIE DE SUTTON.

### 1° - Etude des concentrations intégrées.

Pour pouvoir procéder commodément aux calculs théoriques des concentrations intégrées, il est nécessaire de définir une situation météorologique type représentant le mieux possible, en moyenne, la situation réelle malheureusement assez complexe. On a vu notamment que le transport vers le SE dans des conditions assez bien définies n'a commencé qu'une douzaine d'heures environ après le début de l'émission de matières radioactives.

Pour la période de diffusion qui nous intéresse, nous sommes amenés à adopter les valeurs moyennes suivantes:

- Gradient vertical de température:  $-1^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$
- Vitesse moyenne du vent:  $5,5 \text{ m/s}$
- Direction du vent: N puis NW

La rotation du vent explique que nous ayons, sur la carte des concentrations intégrées (fig. 2) un premier maximum au Sud de Windscale, à Liverpool ( $1007.10^{-12} \text{C.j/m}^3$ ). Le maximum réel devait se trouver quelque part sur la côte de la mer d'Irlande, à quelques kilomètres de Windscale, d'après les conditions de diffusion. On remarque sur la carte qu'ensuite les concentrations maximales sont axées Nord Ouest-Sud Est, traduisant ainsi la rotation du vent.

Nous nous limiterons au calcul des concentrations maximales, c'est-à-dire dans le lit du vent et au voisinage du sol. Dans ces conditions, nous n'aurons à évaluer qu'un paramètre de stabilité, et un seul coefficient de diffusion comme si la diffusion était isotrope, et nous conserverons les valeurs adoptées pendant toute la durée du transport. La formule simplifiée déduite du modèle de Sutton s'écrit alors :

$$\chi = \frac{2 Q}{\pi C^2 \bar{u} x^{2-n}} \exp \left( - \frac{h^2}{C^2 x^{2-n}} \right)$$

où :

$\chi$  = Concentration intégrée,

Q = Quantité totale émise,

h = hauteur de l'émission (125 m),

$\bar{u}$  = vent moyen (vitesse),

x = distance à partir du point d'émission,

n = paramètre de stabilité de l'air,

C = coefficient de diffusion.

Pour fixer les valeurs de n et C nous avons utilisé les travaux expérimentaux de Holland à OAK RIDGE [13] pour les valeurs de n, et ceux de BARAD et HILST [13] pour les valeurs de C.

Ainsi, avec :

$$n = 0,20$$

$$C = 0,205 \text{ m}^{n/2}$$

$$u = 5,5 \text{ m/s}$$

$$h = 125 \text{ m},$$

nous avons l'expression suivante :

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{2,0125 \cdot 10^{-12}}{x^{1,8}} \text{ en unité.jour/m}^3,$$

avec  $x$  en dizaine de Km.

En utilisant cette expression, nous avons calculé des concentrations intégrées théoriques pour des libérations de 10.000, 20.000 et 100.000 Curies. Sur papier log-log (fig 3) nous traçons les droites représentant ces concentrations en fonction de la distance, et nous portons simultanément les valeurs observées, citées précédemment en IV.

On constate que la majorité des observations se situe entre les droites "20.000 C" et "100.000 C", la pente moyenne étant bien conservée. Remarquons que les points situés en dessous de la droite "20.000 C" correspondent à des villes situées à l'écart du lit moyen du vent. Les points situés au-dessus de la droite "100.000 C" correspondent à Londres et à des villes côtières : Cardiff, Portsmouth et Southampton. La présence de noyaux de condensation plus nombreux sur l'agglomération londonienne (fumées industrielles) et sur les côtes (noyaux de condensation marins) pourrait expliquer une augmentation de la concentration apparente par fixation sur des particules plus grosses, lesquelles seraient plus facilement recueillies par les filtres.

Il n'est pas dans notre propos de discuter ici la valeur des résultats publiés. Il faudrait faire une étude sur le coefficient de rétention en I 131 des filtres et les problèmes de captation par les aérosols naturels ou

autres. Ces questions sortent de notre programme et nous adopterons les valeurs fournies par Crooks.

Il apparaît donc que ces valeurs se situent bien entre les valeurs théoriques calculées pour des lâchers de 20.000 C et 100.000 C d'I 131. Ces derniers chiffres sont ceux auxquels nous étions arrivés à la conclusion du paragraphe III.

## 2<sup>o</sup> - Etude du dépôt sur le sol

Toujours dans les mêmes conditions, l'expression du dépôt maximum sur le sol déduite par Chamberlain [13] du modèle de diffusion de Sutton, dans le lit du vent et par temps sec, est la suivante :

$$\omega_{s \max} = \frac{nQ}{2e \pi^{1/2} C^2 x^{2-n/2}} \exp\left(-\frac{h^2}{x^{2-n}}\right)$$

soit dans notre cas particulier :

$$\frac{\omega_{s \max}}{Q} = \frac{2,02 \cdot 10^{-7}}{x^{1,8}} \exp\left(-\frac{1,48}{1,8}\right)$$

en  $m^{-2}$  avec x en km.

Le maximum théorique a lieu à une distance de 1.200 mètres du point d'émission.

On a reporté sur le graphique de la figure 3 les courbes théoriques de dépôt pour des lâchers de 10.000,

20.000 et 100.000 Curies d'I 131, ainsi que les valeurs observées, corrigées au 7 Octobre, qui figurent au paragraphe 4 et qui sont pointées par une croix (+). On remarque immédiatement que les valeurs observées sont en général plus faibles que les valeurs théoriques d'un facteur 10 environ. Mais on se rappelle que, dans les premières heures du lâcher, le vent a eu une composante Nord (azimut du panache 180°) avant de tourner au Nord-Ouest (azimut du panache par rapport à Windscale 135°). Les valeurs observées à courte distance dans l'azimut 135 à 140° n'ont donc pas été observées sur l'axe. Ce sont des dépôts latéraux justiciables d'une certaine correction que nous allons déterminer.

Nous avons tracé (fig. 4) les droites donnant la concentration (en p ‰ de la concentration sur l'axe à la distance  $x$  de l'émission) en un point ( $x, y$ ) d'après la formule complète de Sutton. Ce graphique porte également des droites d'azimut déterminé par rapport à l'axe du panache. On voit que la concentration théorique décroît très rapidement transversalement à l'axe du vent. Par exemple, à 2,5 km de l'axe ( $y = 2,5$  km), elle n'est que 1 ‰ de la concentration sur l'axe si on se place à 10 km. Il est donc du plus haut intérêt de connaître la direction du vent à moins de 5 degrés près.

Nous prendrons, dans l'impossibilité où nous sommes d'avoir un réseau de mesures détaillées, un azimut moyen pour le panache de 150°. Les premières observations sont faites dans l'azimut 135°, soit à 15° du lit du vent.

Le dépôt (proportionnel à la concentration avec un facteur  $V_g$  supposé constant,  $V_g$  étant la vitesse de dépôt) est de l'ordre de 5 % du dépôt sur l'axe à 3 km. Les observations suivantes, faites dans l'azimut 140° sont, de l'ordre de 10 % du dépôt sur l'axe entre 6 et 16 km. Il est difficile d'utiliser les données relevées à la Montagne Black Combe, il faudrait reprendre les calculs en se plaçant à l'altitude effective du dépôt mesuré.

En corrigéant les valeurs observées dans le rapport  $\frac{100}{5} = 20$  pour la première et  $\frac{100}{10} = 10$  pour les autres, on trouve une série de valeurs alignées approximativement entre les courbes "20.000 C" et "100.000 C".

Cette conclusion rejoint donc apparemment la précédente concernant les concentrations mais il nous semble utile d'en discuter maintenant le bien-fondé.

La diffusion latérale théorique que nous avons prise en considération pour le dépôt sur le sol, peut paraître en contradiction avec la diffusion latérale effective beaucoup plus faible que l'on constate sur les concentrations au-delà de 100 km du lieu de l'accident.

Il est évident que la diffusion latérale réelle, due précisément, non seulement à la microturbulence, mais aussi à la rotation aléatoire de la direction du vent, est de toutes façons sensiblement supérieure à la diffusion thé-

orique calculée comme nous l'avons fait en négligeant les variations du vent synoptique moyen. Les valeurs théoriques sur l'axe du vent moyen sont donc généralement plus fortes que les valeurs réelles. Cette remarque diminue la validité de notre correction quantitative pour le dépôt mais n'en supprime pas l'intérêt qualitatif, car il demeure que les rares mesures de dépôt sur le sol, dont nous disposons, sont indiscutablement en dehors du lit moyen du vent et par conséquent inférieures aux valeurs réelles sur l'axe.

D'autre part, il y a une autre raison pour laquelle nous devons nous attendre à trouver des valeurs théoriques de dépôt supérieures aux valeurs observées.

Nous avons indiqué précédemment que l'expression due à Chamberlain donnait une valeur maximale toujours supérieure a priori à la valeur réelle quelle que soit la distance. En effet, pour s'affranchir des incertitudes quant aux conditions de dépôt, et de l'impossibilité de connaître exactement, à chaque instant et dans tous les cas, la vitesse de dépôt  $V_g$ , Chamberlain a été amené à adopter pour  $V_g$  une expression simple pour laquelle le dépôt  $U_s$  passe par un maximum quel que soit  $x$ .

C'est ainsi que pour l'Iode, l'écart entre le calcul et la réalité peut atteindre un facteur 2 à 4 selon la distance et les conditions météorologiques.

On peut donc affirmer que l'écart entre les valeurs de dépôt calculées et mesurées est largement infé-

rieur à un facteur 10, et dans le sens conservatif du point de vue de la sécurité.

### 3° - Vitesse de dépôt

La vitesse de dépôt est définie par :

$$v_g = \frac{\omega_s}{\chi}$$

Il nous faut extrapolier les droites tiretées moyennes du graphique, les domaines n'étant pas les mêmes pour les concentrations (65 à 700 km) et les dépôts (5 à 26 km).  
A la distance 50 km, on trouve :

$$\omega_s = 7 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

$$\chi = 6 \cdot 10^{-9} \text{ C.j /m}^3$$

d'où :  $v_g = \frac{\omega_s}{\chi} = \frac{7 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{6 \cdot 10^{-9} \cdot 86400} \text{ cm/s}$

soit :  $v_g = 1,35 \text{ cm/s.}$

Les valeurs habituellement indiquées sont effectivement de l'ordre de quelques cm/s (1 à 10 suivant les conditions météorologiques).

### VII - CONCLUSION :

En utilisant le modèle de diffusion atmosphérique de Sutton dans des conditions simples et commodes, c'est-à-dire avec une seule valeur de chacun des paramètres dans le

temps et dans l'espace pour un ensemble donné de conditions météorologiques, il aurait été possible de prévoir les conséquences de l'accident de Windscale (concentration d'Iode 131 dans l'air et dépôts sur le sol) avec un facteur d'incertitude de l'ordre de 5 et en tous cas certainement inférieur à 10. D'autres vérifications seraient évidemment du plus haut intérêt, et notamment avec des situations atmosphériques différentes, mais il semble que nous avons le moyen de prévoir correctement par le calcul, à partir d'hypothèses précises, les conséquences d'un incident ou d'un accident nucléaires, ainsi d'ailleurs que celles d'un fonctionnement normal ou d'un rejet contrôlé.

Il est évident que dans le domaine pratique de la sécurité et de la protection des populations la précision requise dans l'obtention des résultats est d'un ordre de grandeur très inférieur à celle qui serait nécessaire pour des études fondamentales de microturbulence atmosphérique.

*Manuscrit reçu le 12 avril 1960.*

BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] Livre Blanc anglais - Accident à Windscale du 10 Octobre 1957.
- [ 2 ] HERING, HERPIN et PASCAL - Rapport de mission à Risley
- [ 3 ] JOFFRE - Rapport de mission à Risley
- [ 4 ] Rapport du Service des Grandes Piles de Saclay du 4 Février 1958.
- [ 5 ] DUNSTER HOWELLS et TEMPLETON - District surveys following the Windscale, Accident Octobre 1957 - P. 316
- [ 6 ] STEWART et CROOKS - Long range travel of the radioactive cloud from the accident at Windscale - Nature 6 Septembre 1958.
- [ 7 ] CHAMBERLAIN et DUNSTER - Deposition of radioactivity in NW England from the accident of Windscale - Nature 6 Septembre 1958,
- [ 8 ] CHAMBERLAIN - AERE Report HP/R 2606 (1958)
- [ 9 ] KUPER et GOWAN - Conséquences d'un accident nucléaire P 430 - Juin 1958 - Genève.

- [10] WASH. 740 - Effects of fission products release on humans and land use.
- [11] Journal de Radiologie et d'Electrologie T 36  
n° 10 bis - Octobre 1955  
Recommandations de la Commission Internationale  
de Protection contre les Radiations.
- [12] Compte-rendu de la visite effectuée le 3 Mars  
1958, à SACLAY, par M. CROOKS.
- [13] Meteorology and Atomic Energy AECU 3066
- [14] J.M. LAVIE et A. DOURY - Evaluation théorique des  
risques liés au fonctionnement d'une pile  
(En préparation).



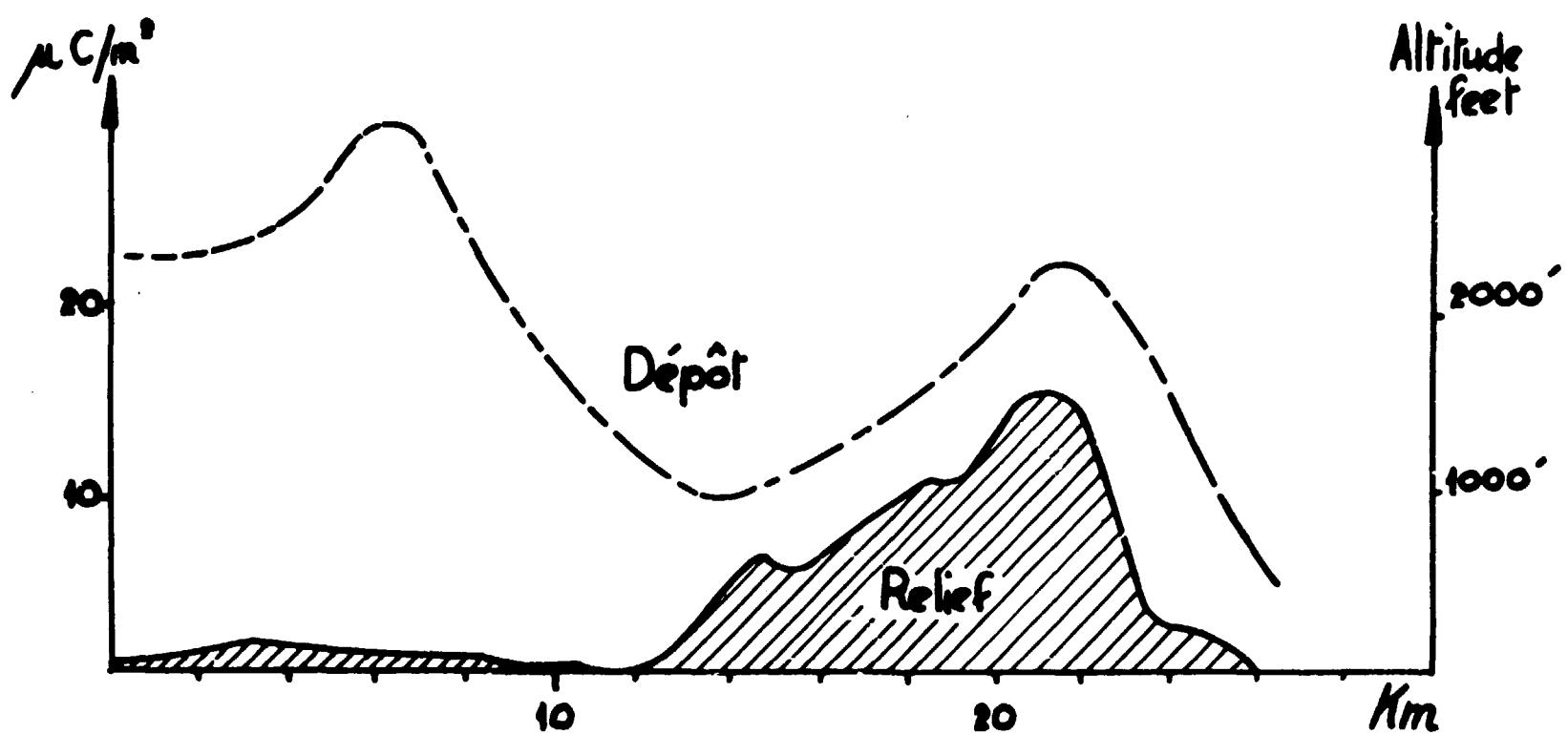


Fig 1 - Dépôt d' $I^{131}$  dans l'azimut  $145^\circ$  de Windscale  
 (Corrigé au 7 octobre)

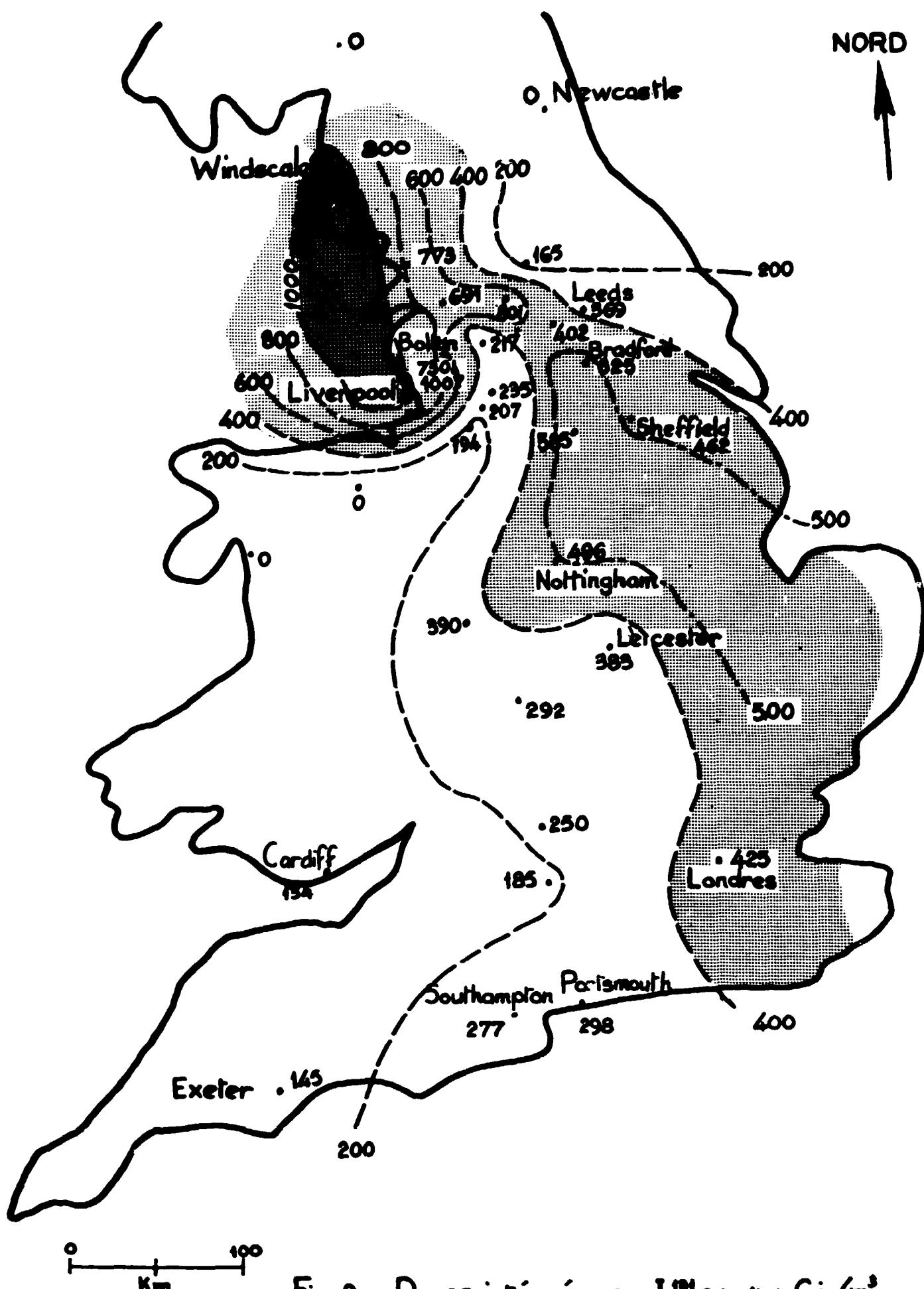
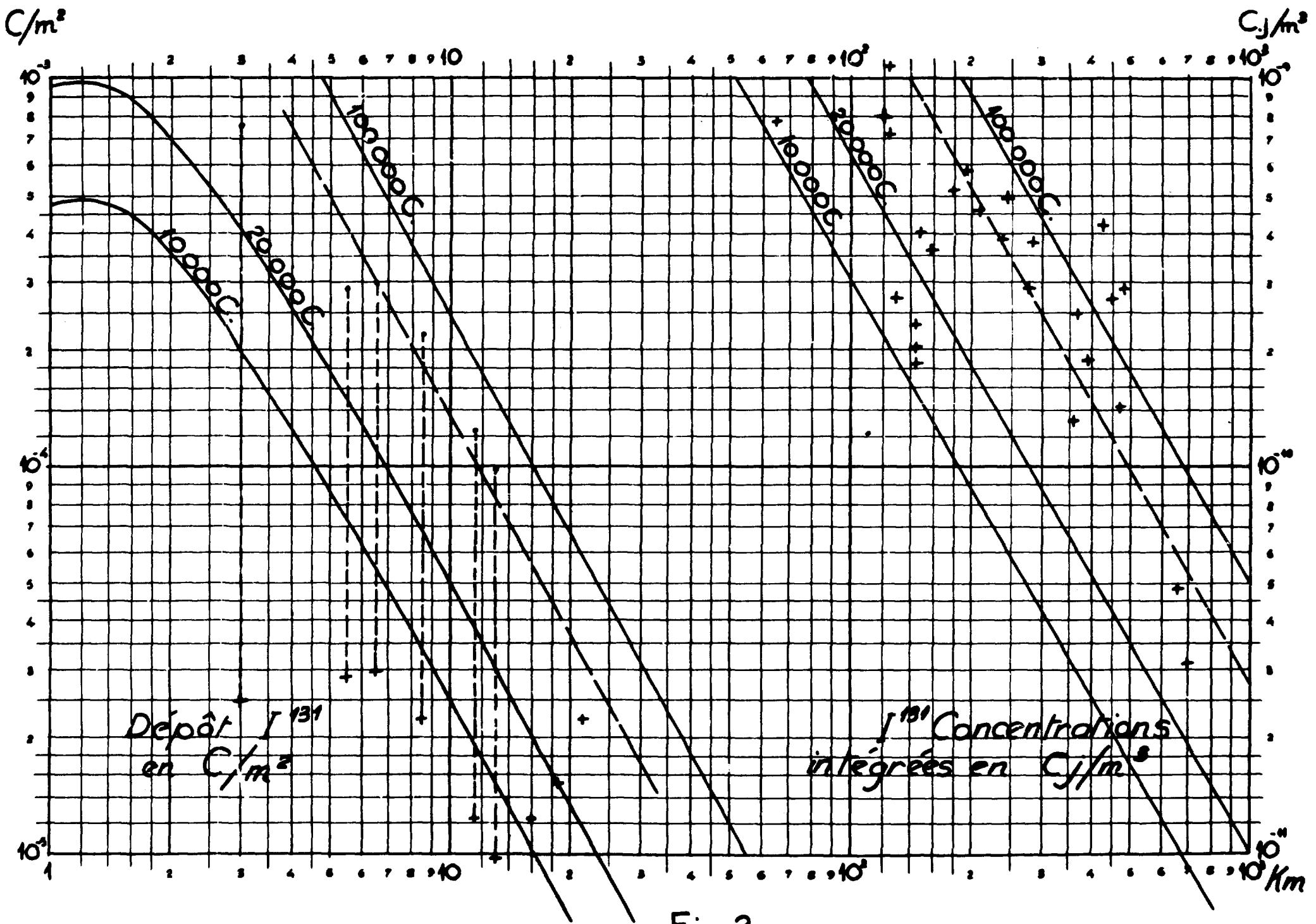


Fig.2 - Doses intégrées en  $I^{131}$  en  $\mu\mu\text{Cj}/\text{m}^3$



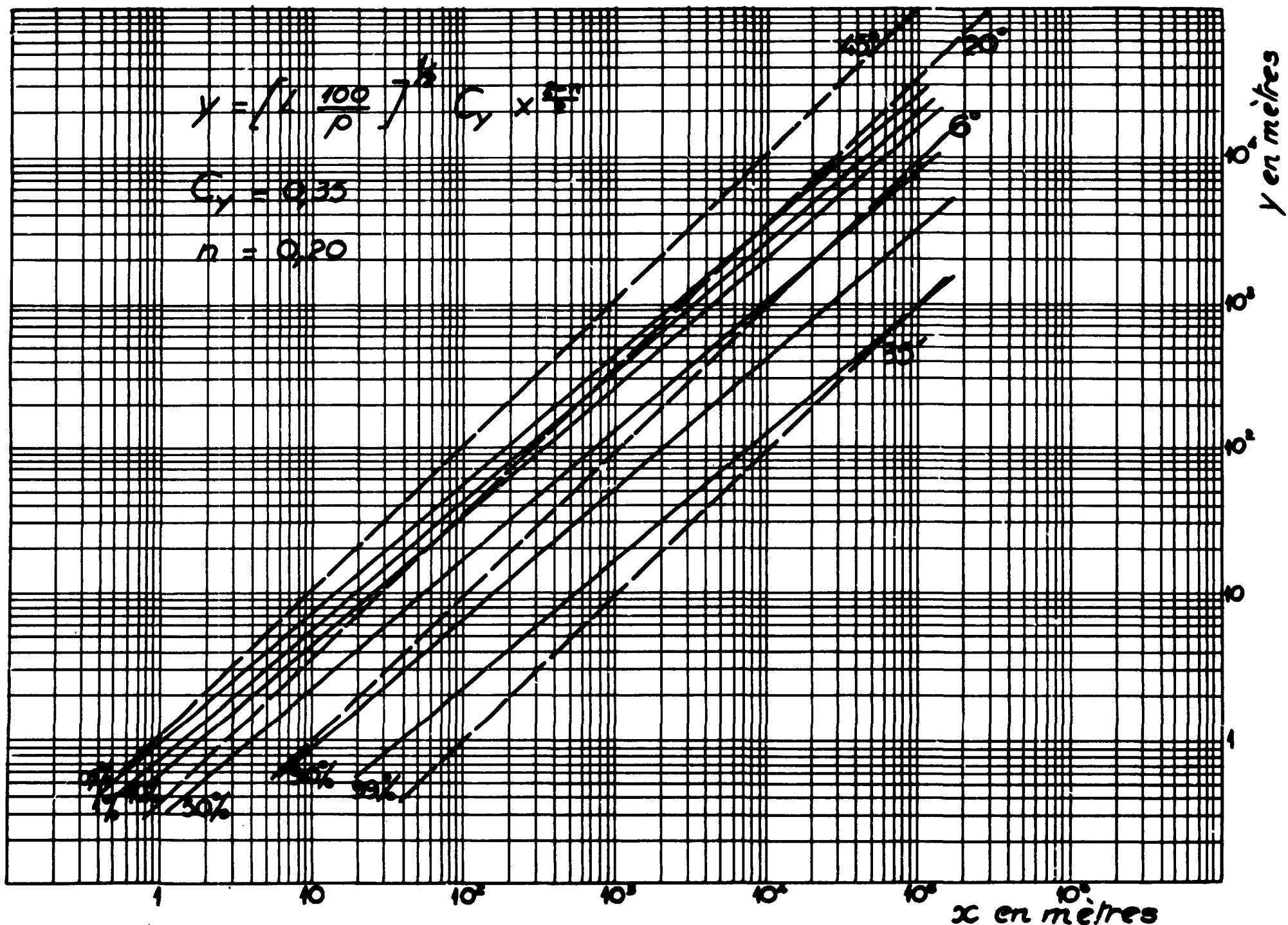


Fig 4

**FIN**