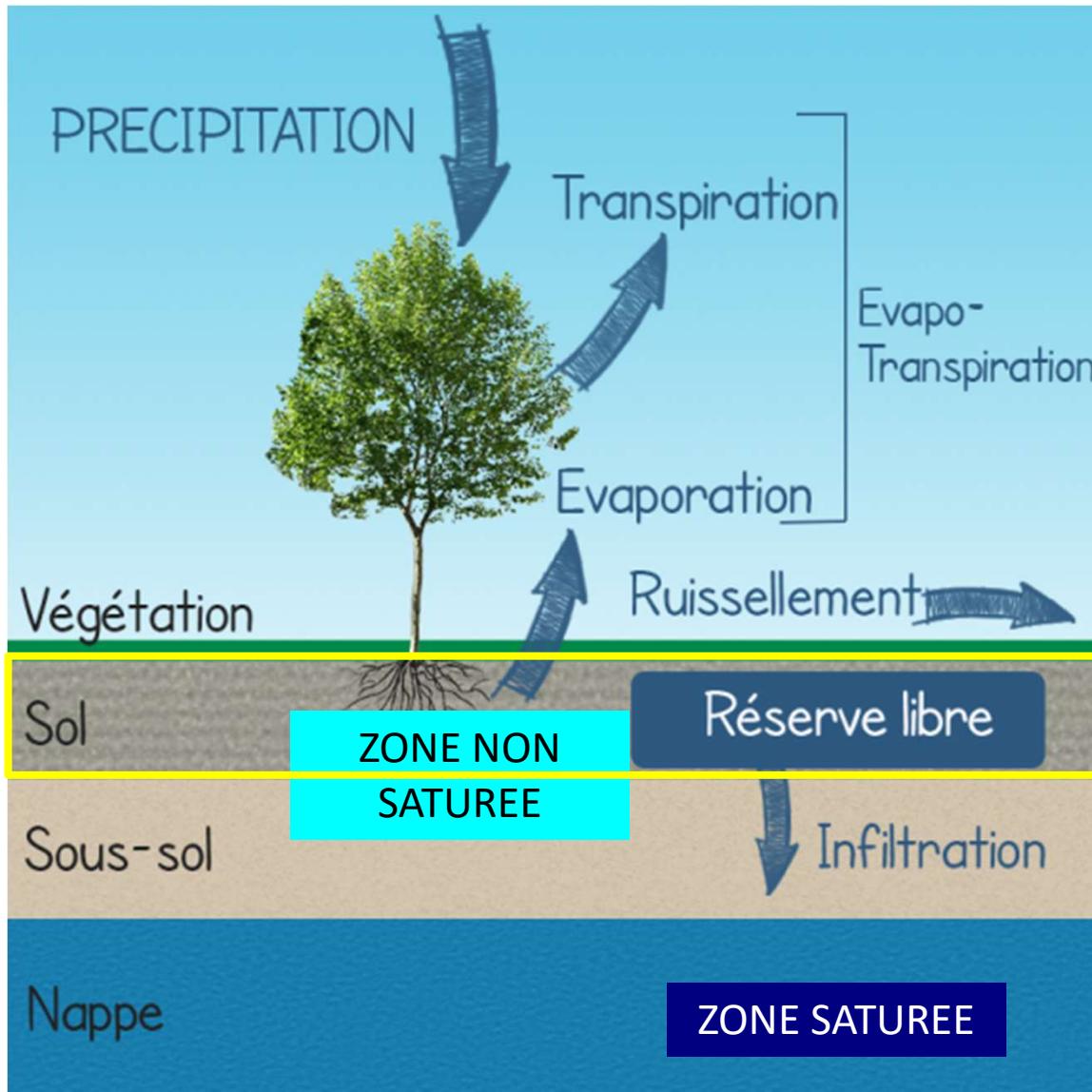


I. L'eau dans le sol



**RESERVE
UTILE**

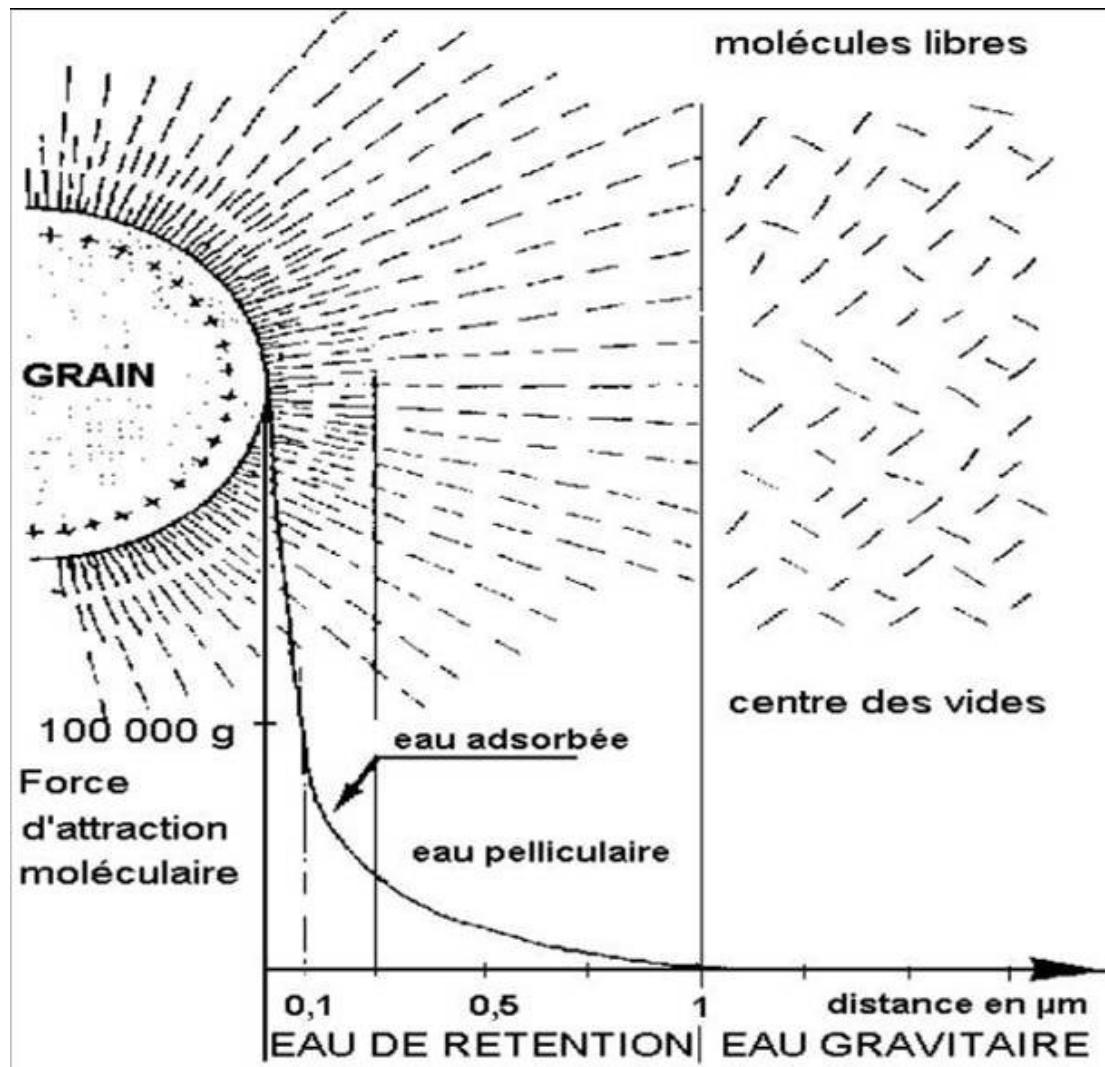
*Le compartiment de surface
= zone d'évaporation*

*Le compartiment « inter-
médiaire » = zone d'aération*

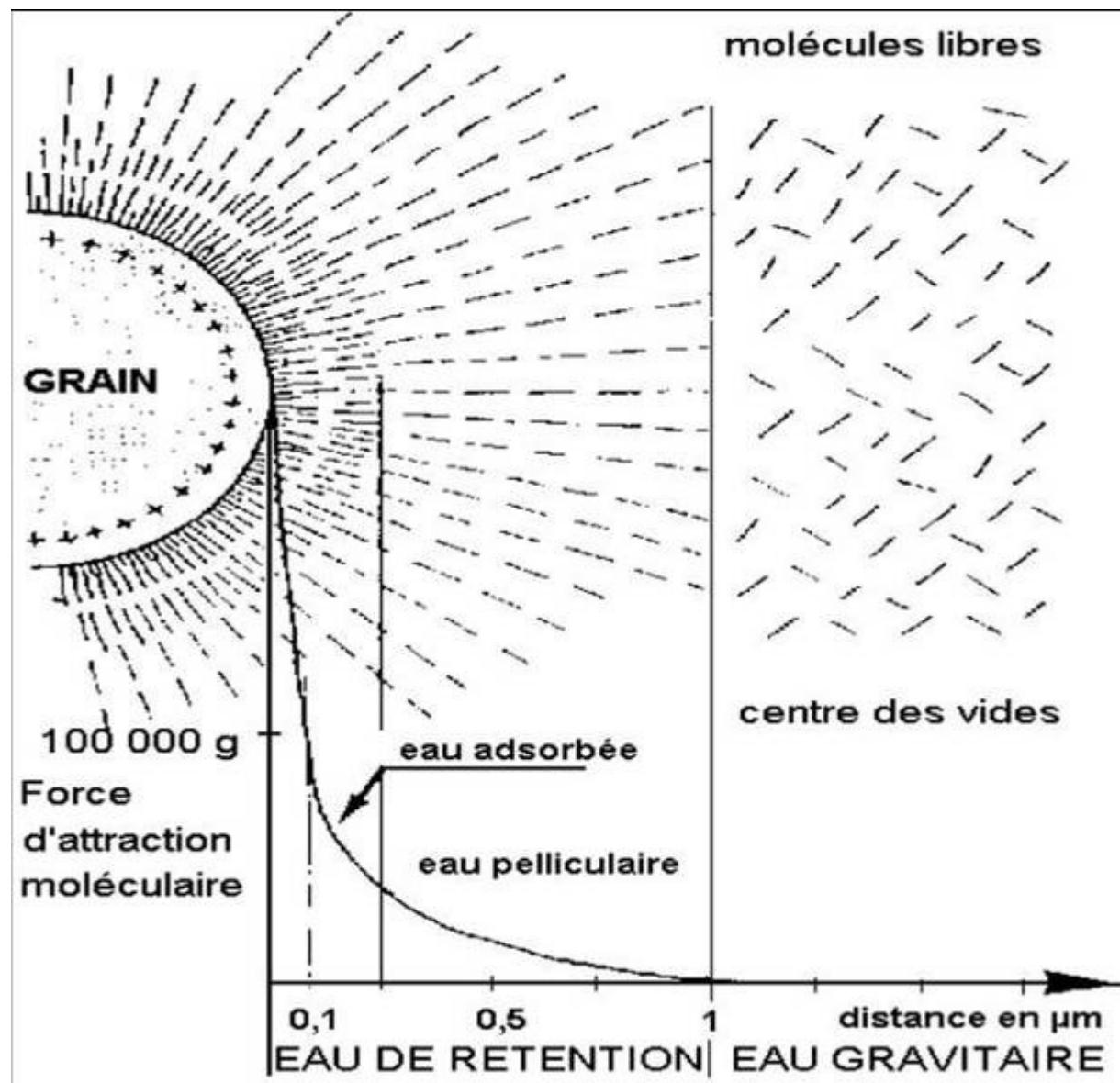
*Le compartiment de
profondeur = zone saturée*

I. L'eau dans le sol

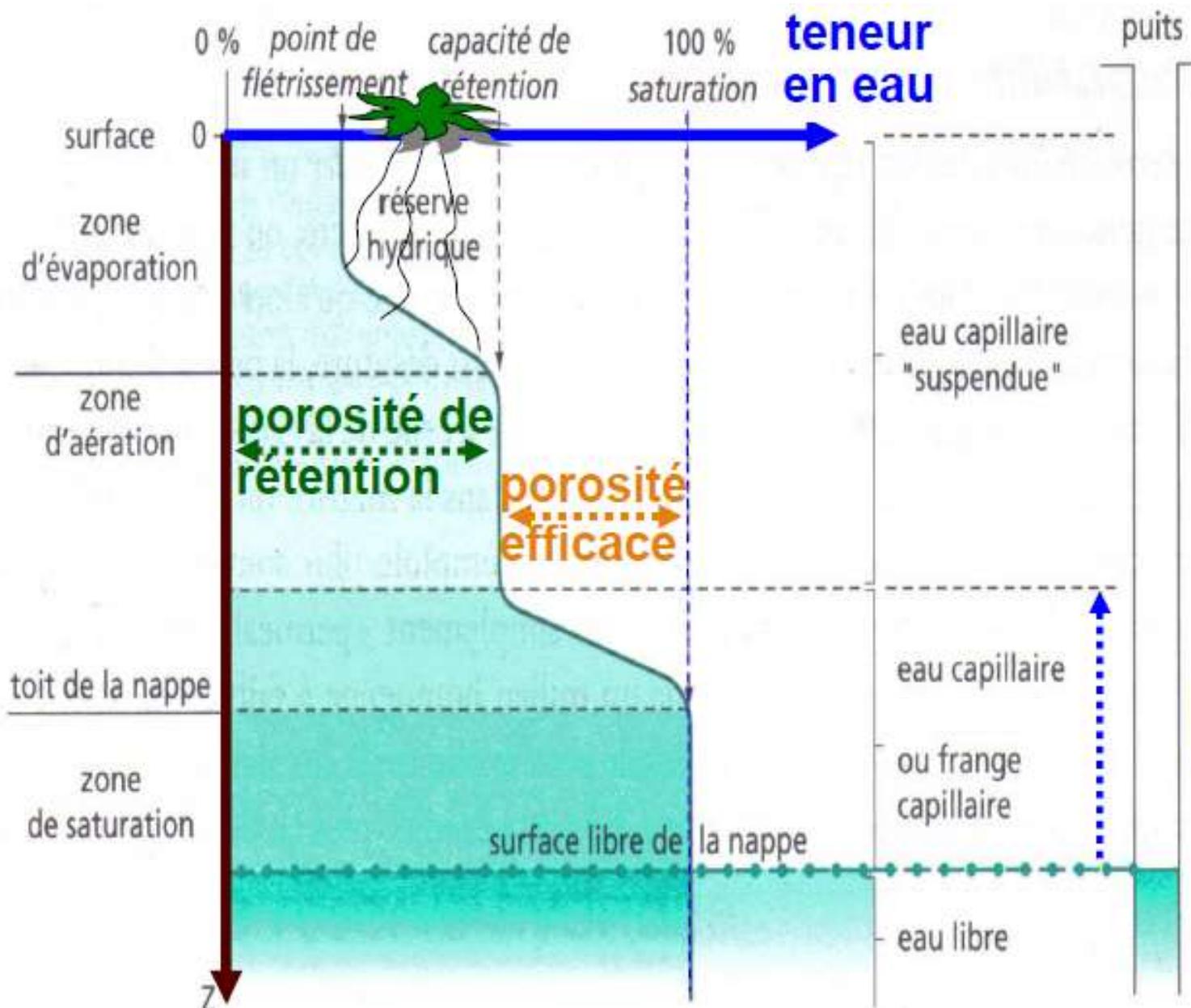
Relation entre la force exercée sur l'eau par la particule et les terminologies utilisées pour qualifier l'aptitude de l'eau à s'évacuer



Relation entre la force exercée sur l'eau par la particule et les terminologies utilisées pour qualifier l'aptitude de l'eau à s'évacuer



Le profil hydrique théorique d'un sol convenablement réhumecté puis ressuyé



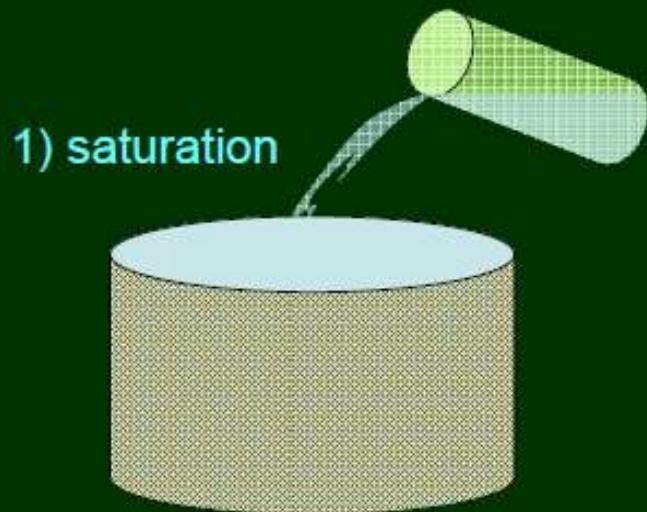
définitions

La porosité du sol

porosité : part des vides dans la roche - s'exprime en % du volume total de la roche

- **porosité efficace** : part des vides permettant l'écoulement de l'eau dans la roche (%)

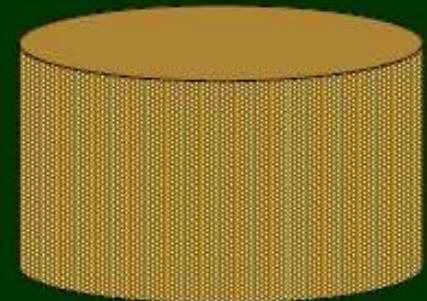
- **porosité de rétention** : part des vides piégeant l'eau dans la roche (%)



1) saturation

2) ressuyage

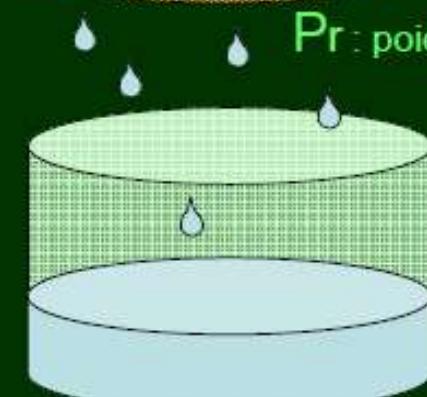
3) étuvage



P_s : poids à saturation

P_r : poids ressuyé

P_e : poids étuvé



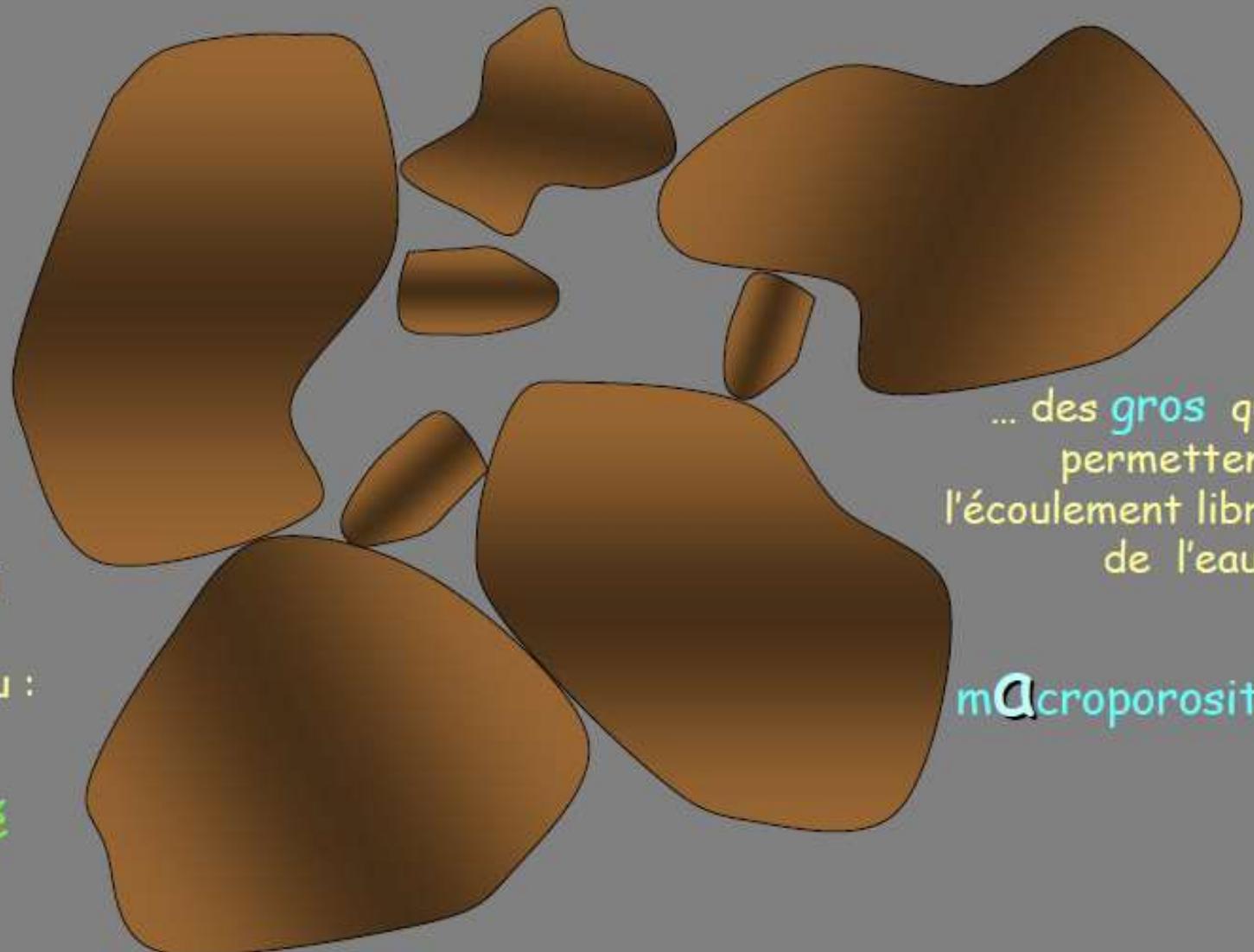
V_e : volume d'eau libre

L'agencement des grains du sol

des vides ...

... des petits qui
participent à la
rétention de l'eau :

microporosité



... des gros qui
permettent
l'écoulement libre
de l'eau :
macroporosité

- *L'eau gravitaire = eau libre*

EAU DES MACROPORES

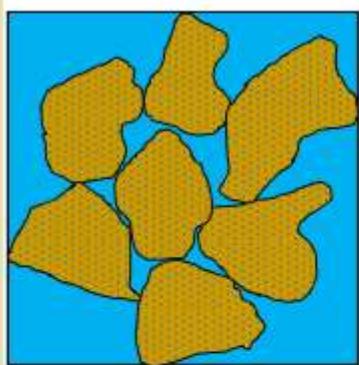
Capacité au champ

- *L'eau de rétention capillaire*

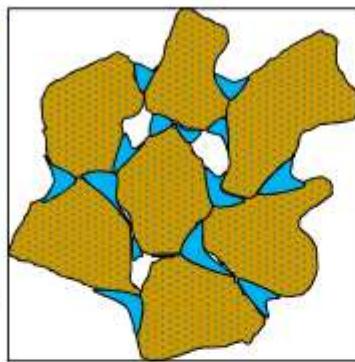
EAU DES MICROPORES

Point de flétrissement

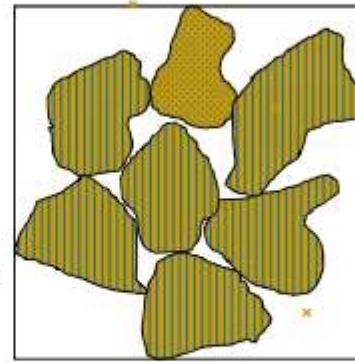
- *L'eau adsorbée ou hygroscopique ou pelliculaire*



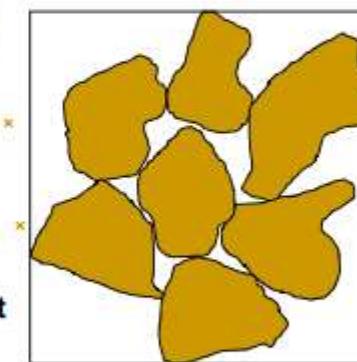
Sol saturé



Sol à capacité de rétention



Sol au point de flétrissement



Sol sec

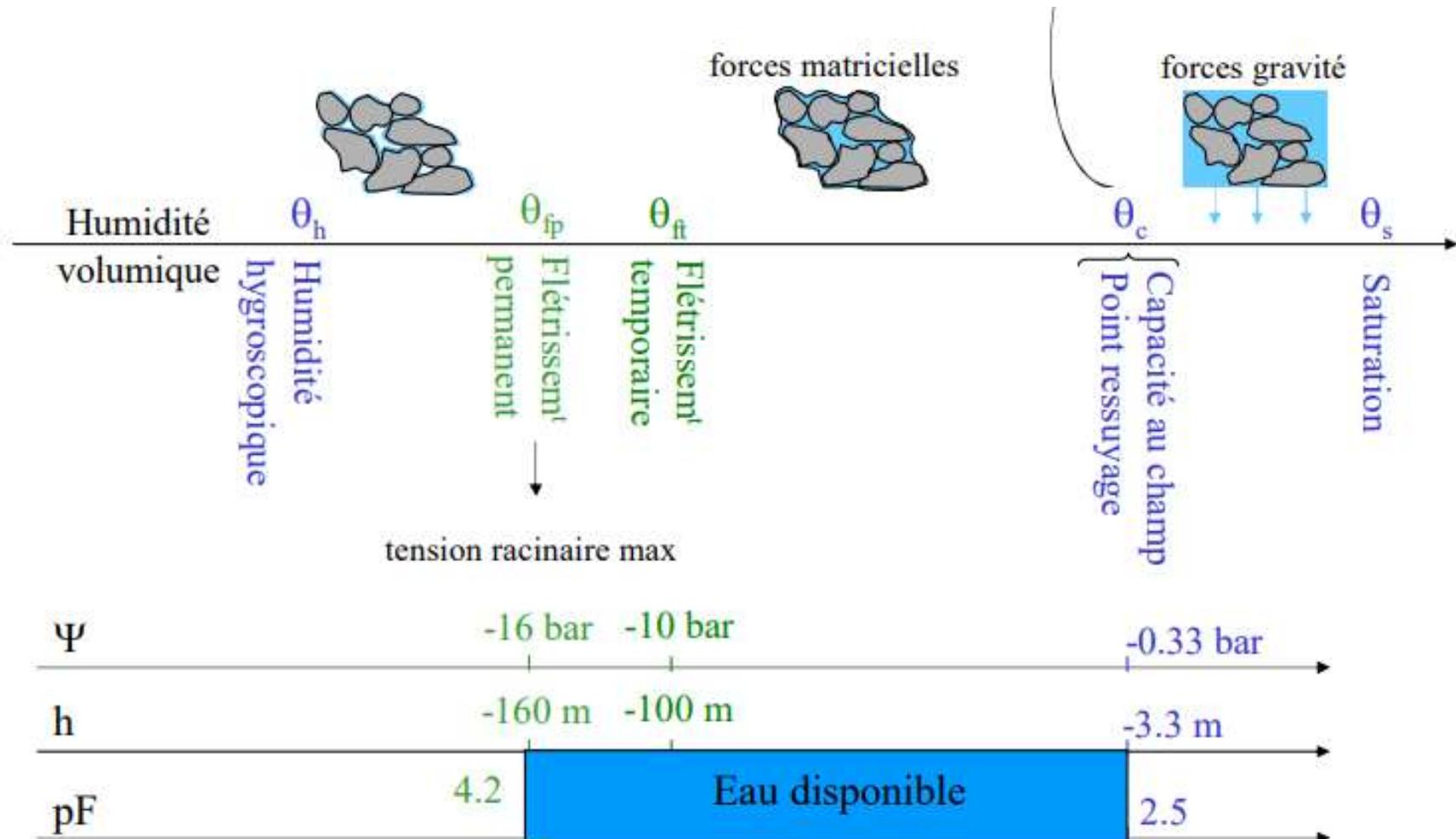
1 10 100 1000 10000 100000

Potentiel hydrique (-kPa)

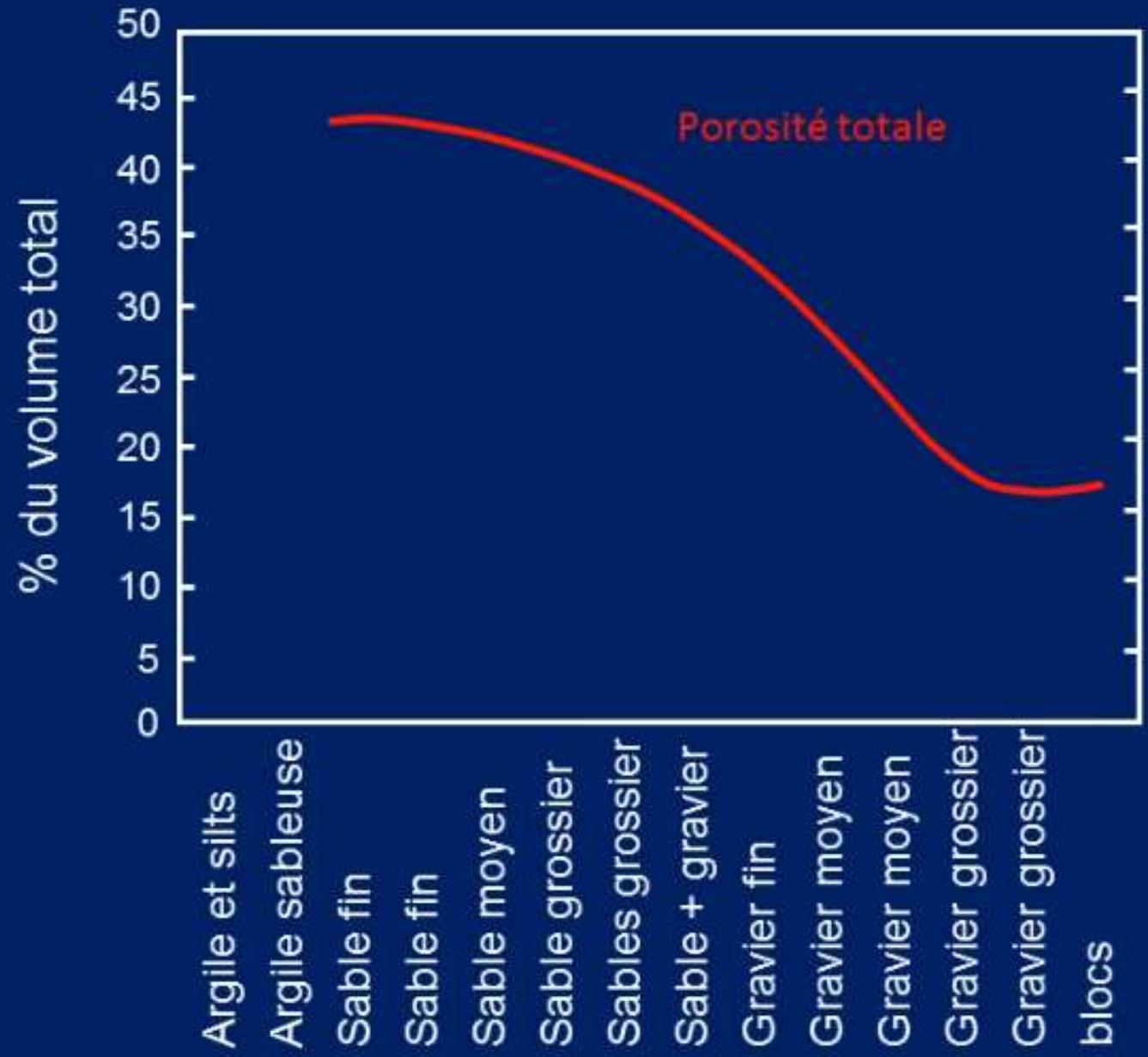
La tension de succion du sol peut être exprimée en unités de pression ou en hauteur d'eau. Les pédologues emploient volontiers une unité particulière, le pF, qui est le logarithme de la pression négative P exprimée en cm d'eau :

1 pression de 1 atmosphère (1013 hPa) correspond à un pF de 3.

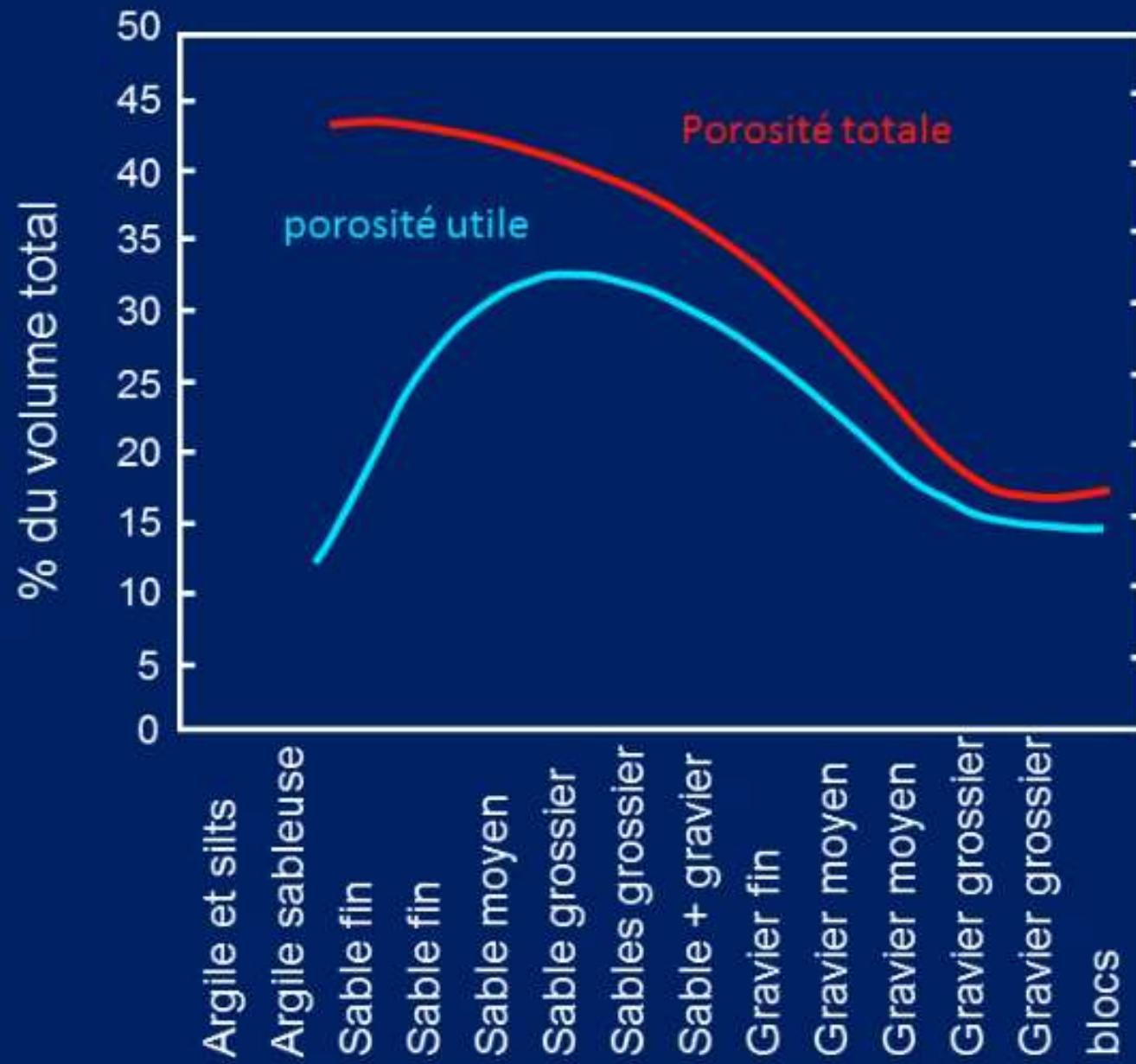
$$pF = \log P$$



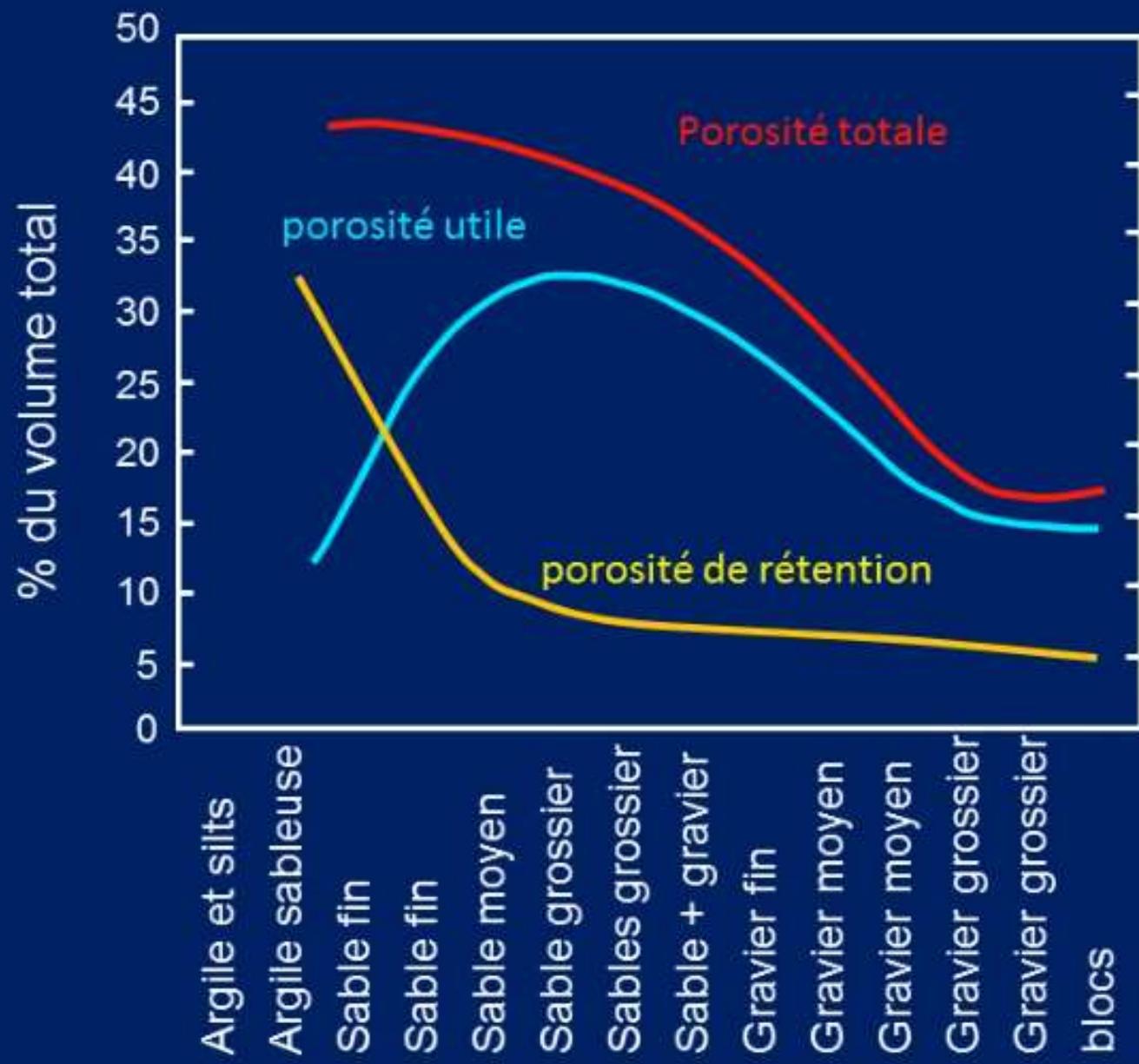
POROSITES ET GRANULOMETRIE



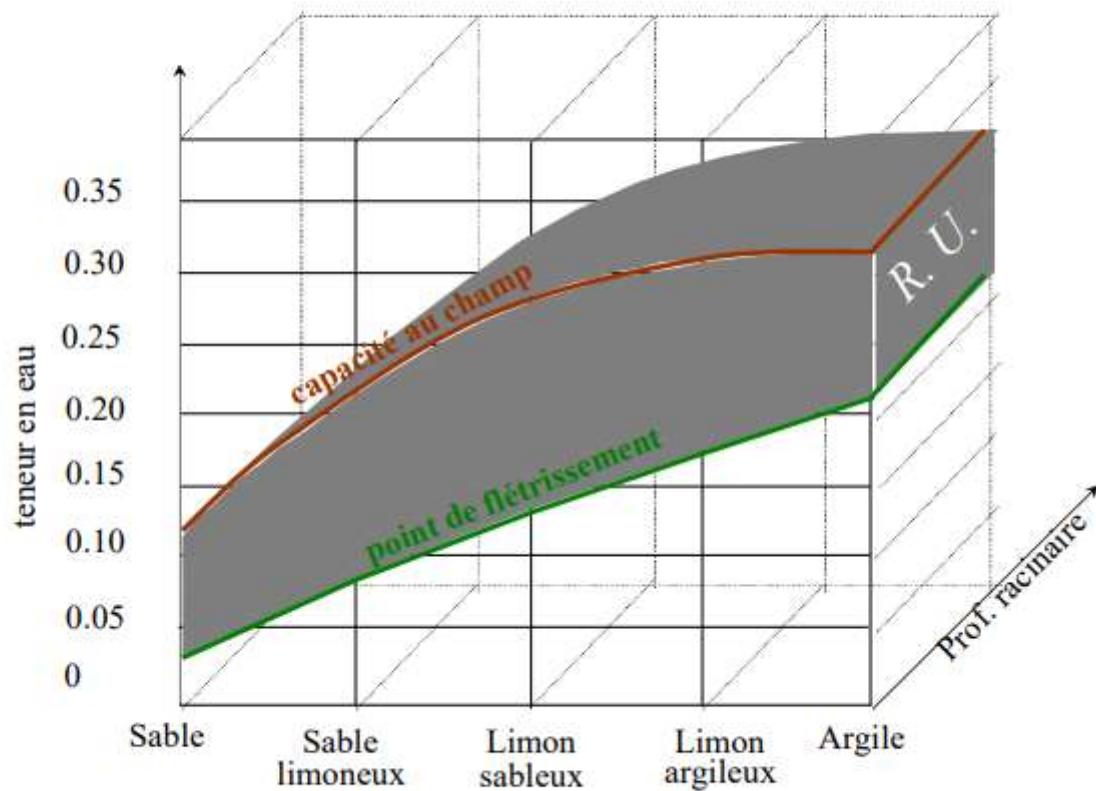
POROSITES ET GRANULOMETRIE



POROSITES ET GRANULOMETRIE

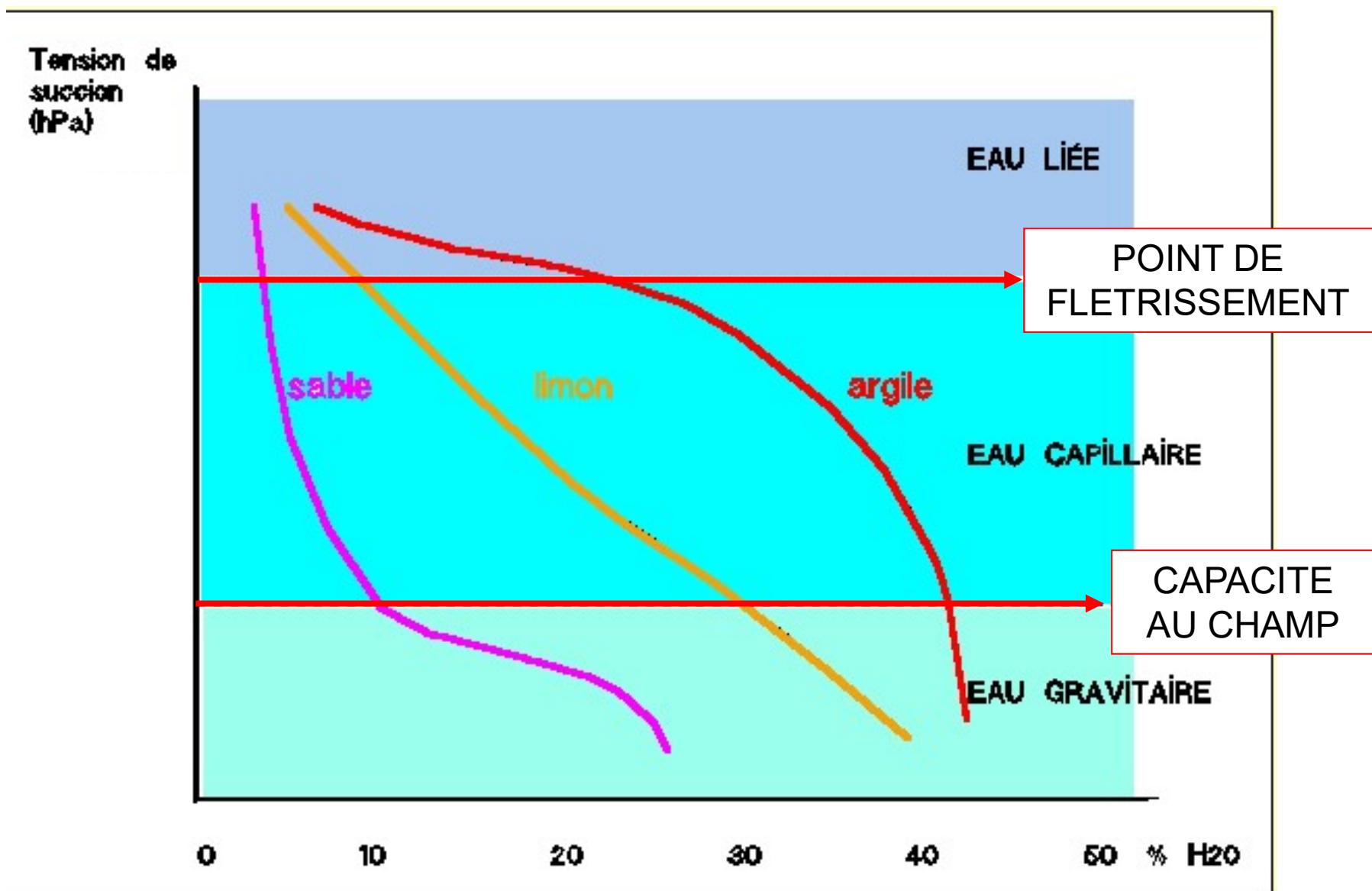


Ordres de grandeur de la RU en fonction du type de sol



Réserve utilisable (R.U.) de divers types de sols (tiré de Musy et Soutter 91)

Tension de succion selon les types de sol (d'après Duchaufour)



II. ETP et ETR

Formules de l'ETP selon Turc

$$\text{ETP} = k \left(T/(T+15) \right) \cdot (Rg + 50)$$

$k = 0,37$ pour février $k = 0,40$ pour les autres mois

T: température mensuelle moyenne

Rg (radiation solaire globale) : Iga (0,18+0,62 Fi)

Iga: radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère

Fi (Fraction d'insolation) : Ins / (H . Njp)

H : durée moyenne du jour

Njp : nombre de jours de la période

II. ETP et ETR

Formules de l'ETR selon Turc

$$\text{ETR} = \frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}}$$

$$L = 0,05T^3 + 25T + 300$$

P précipitations en mm

T température en °C

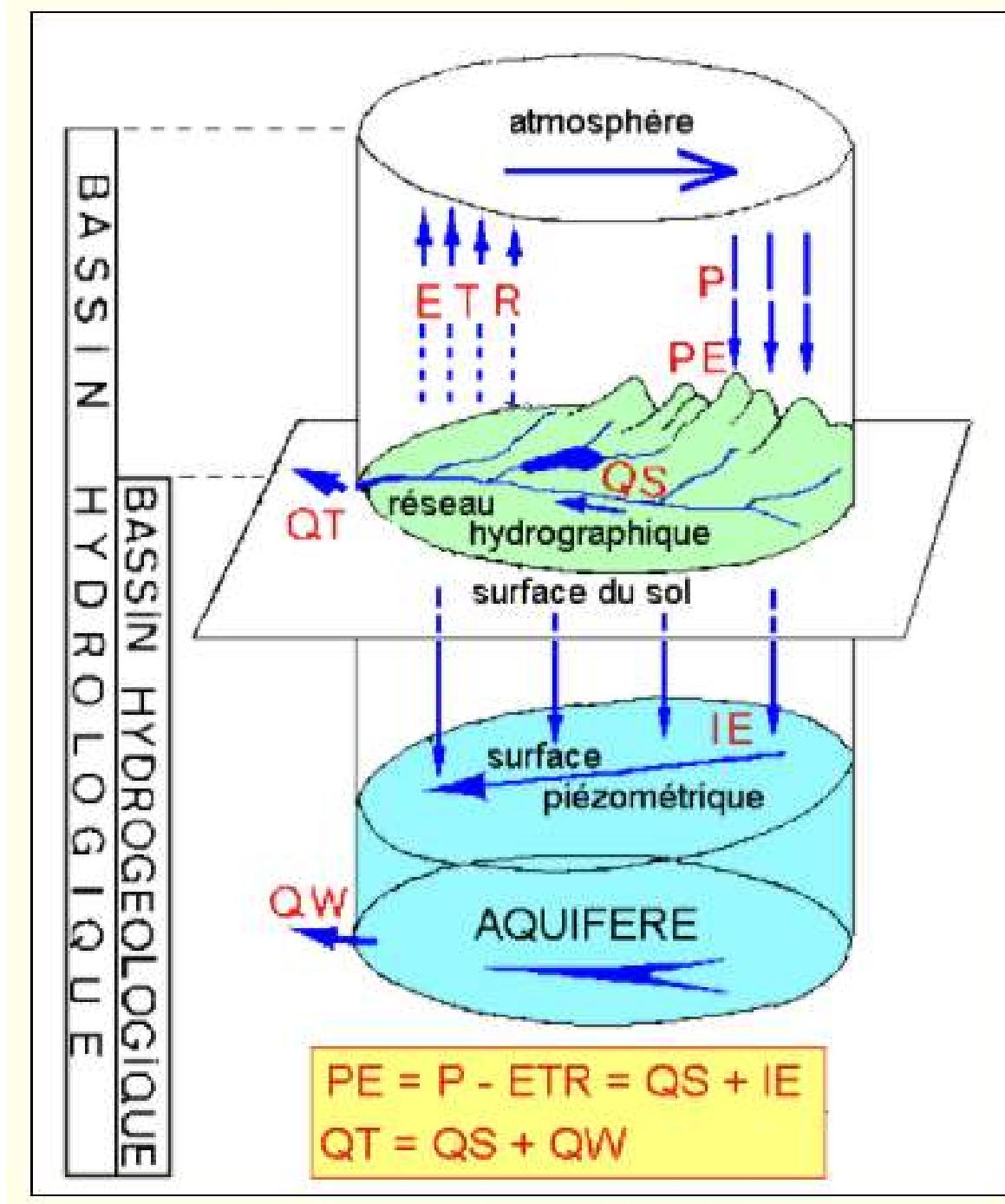
ETR en mm par an

III. Le bilan de l'eau

Après un épisode pluvieux, une partie de l'eau tombée au sol retourne dans l'atmosphère

par **évapotranspiration** (phénomène cumulant l'évaporation de l'eau et la transpiration des plantes) : elle ne bénéficie donc pas aux nappes souterraines et aux milieux aquatiques de surface. L'autre partie ruisselle - potentiellement vers les milieux - et s'infiltra dans le sol - et recharge potentiellement les nappes : elle constitue la **pluie efficace**.

La pluie efficace qui rejoint le sol, participant ainsi aux écoulements et à l'alimentation des nappes d'eau souterraine est estimée à 40%.



L'équation du bilan de l'eau : une équation fondamentale en hydrologie

$$Q = P - ETR \ (+/- \Delta \text{réserves})$$

- ❖ Le régime permanent

$$Q = P - ETR$$

- ❖ Le déficit d'écoulement

$$DE = P - Q$$

DE = Évapotranspiration réelle

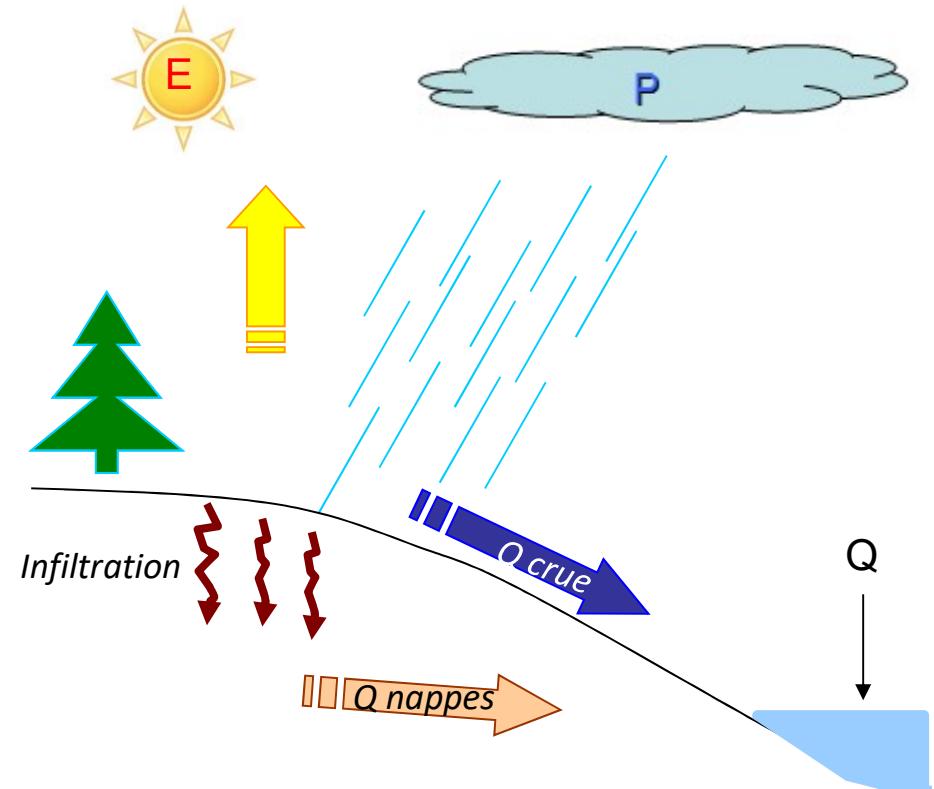
$$Q = P - DE$$

- ❖ Estimation des débits à partir des pluies

$$P = 900 \text{ mm}$$

$$\text{Surface du BV} = 350 \text{ km}^2$$

Q ?



Déficit d'écoulement moyen annuel de L.TURC :

$$DE = P / \sqrt{[0,9 + (P/L)^2]}$$

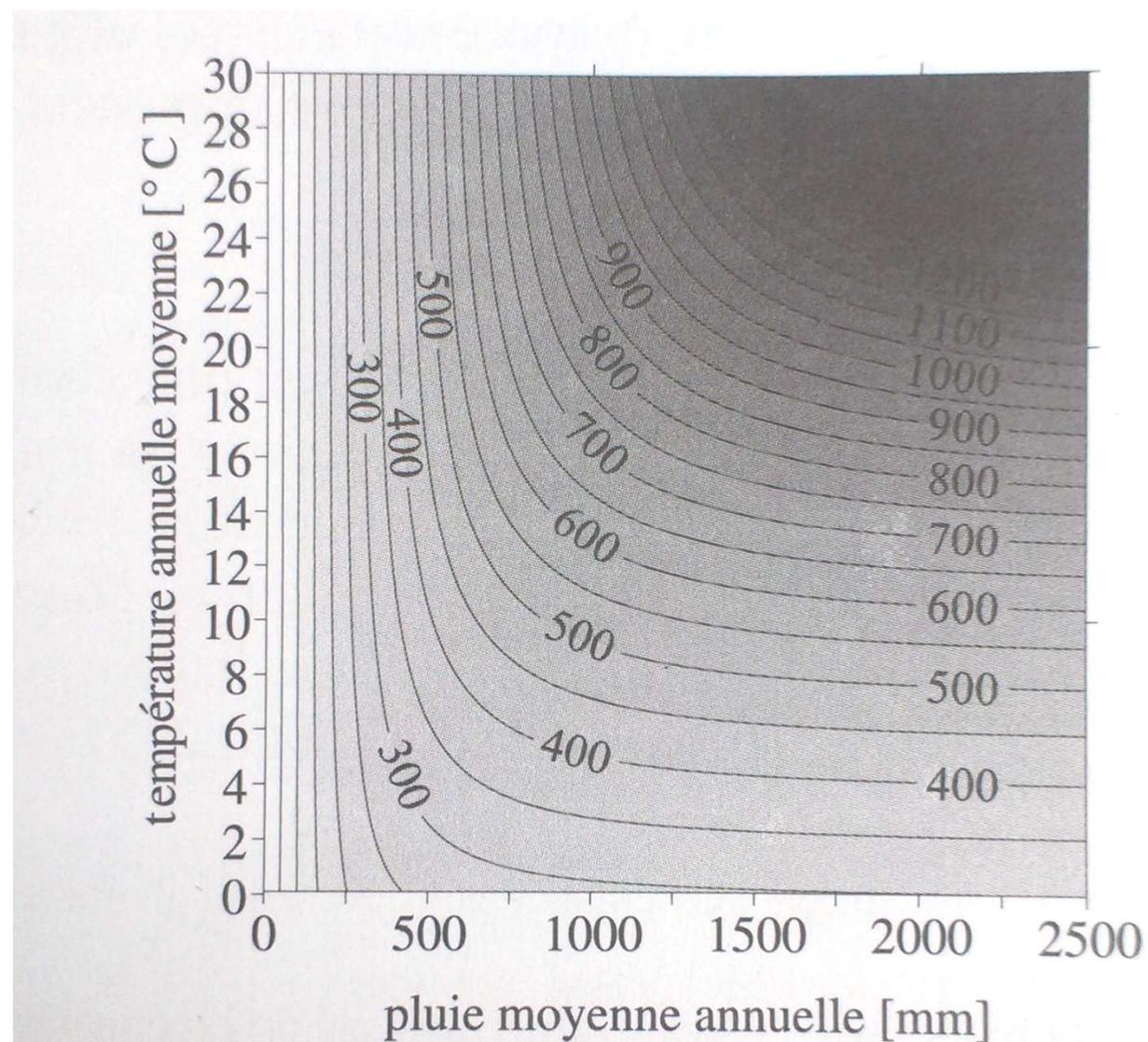
$$L = 0,05T^3 + 25T + 300$$

P précipitations en mm

T température en °C

Calculer le DE pour :

T = 10 °C , P = 900 mm



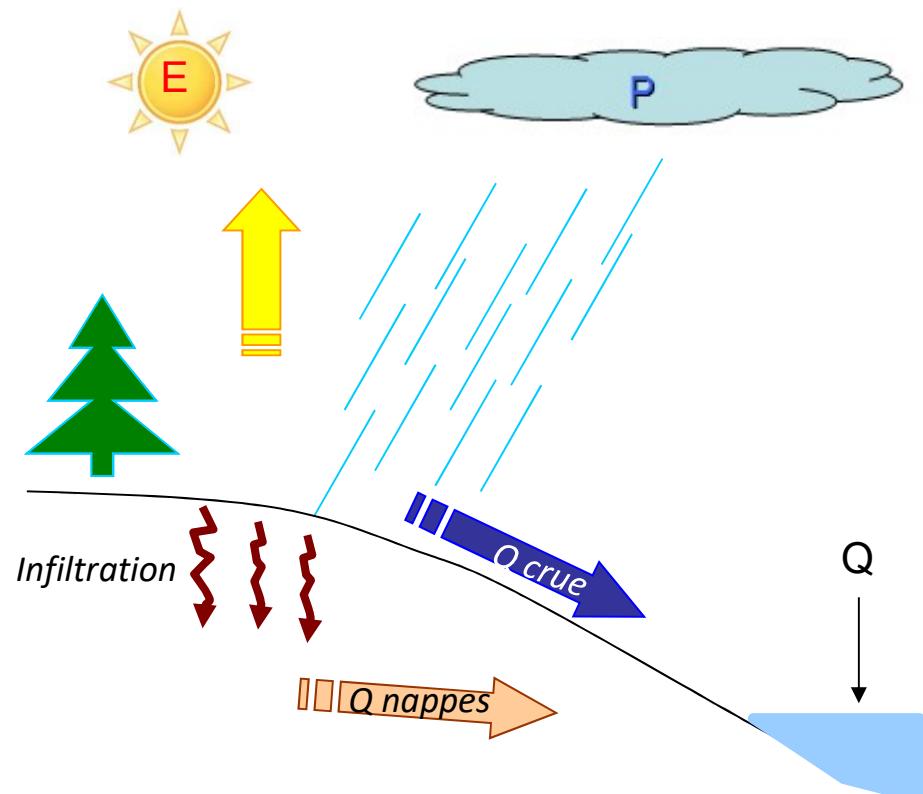
Exemple : La Meuse à St Mihiel (2540 km²)

Module : 30 m³/s

Lame d'eau équivalente : ?

Précipitations annuelles : 930 mm

Équation annuelle du bilan de l'eau : ?



Exemple : La Meuse à St Mihiel (2540 km²)

Module : 30 m³/s

Lame d'eau équivalente : 373 mm

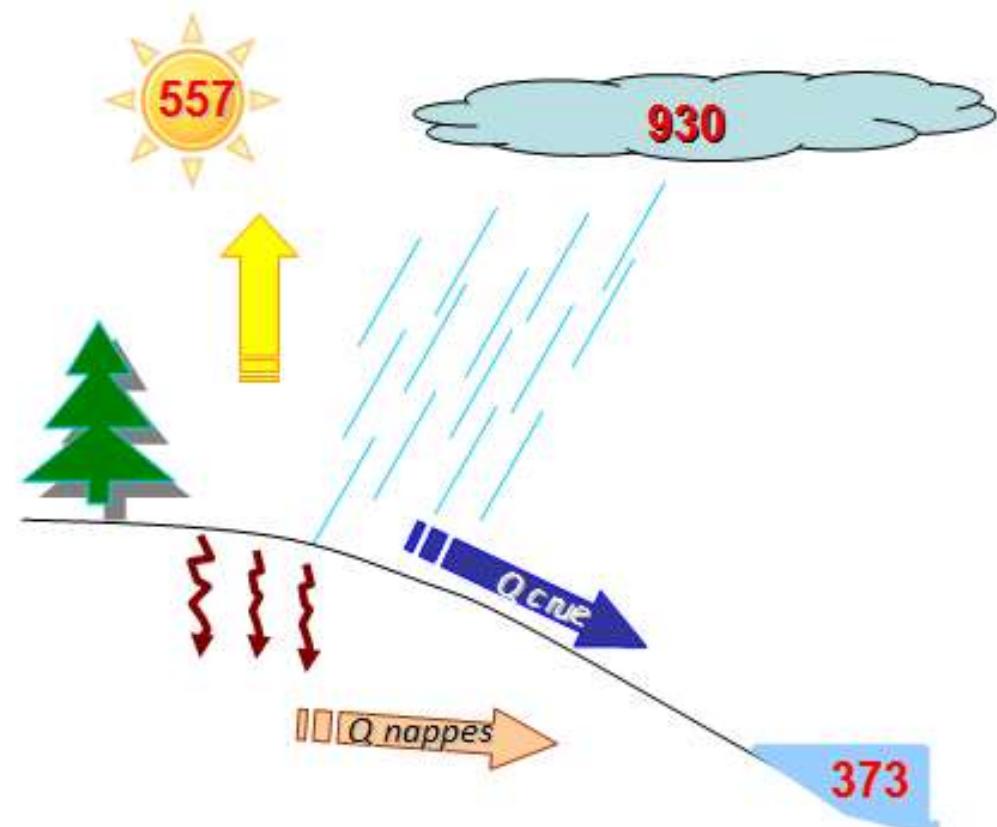
Précipitations annuelles : 930 mm

Équation annuelle du bilan de l'eau : $373 = 930 - 557$

En régime permanent :

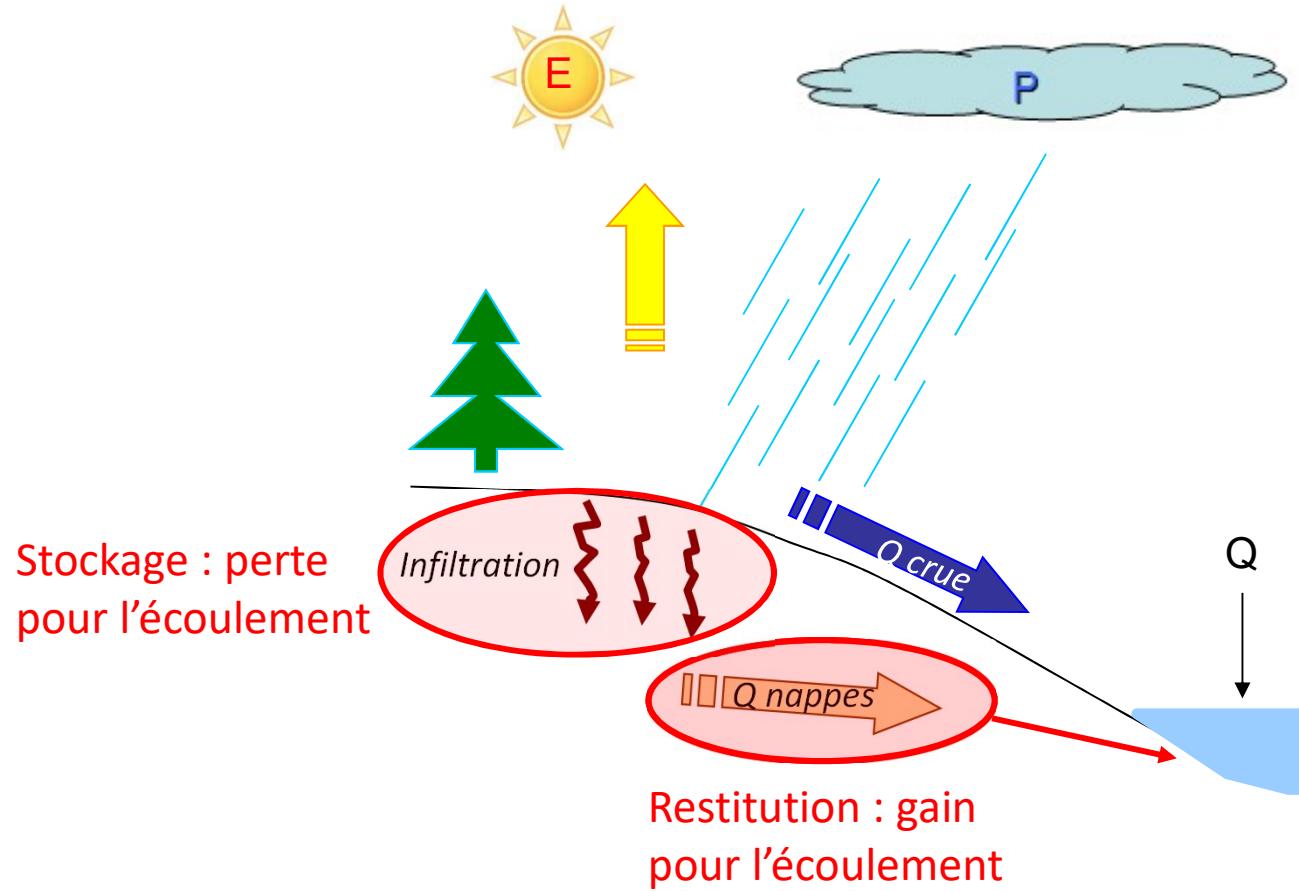
Les entrées sont égales aux sorties sur le cycle (par exemple : l'année)

L'équation fondamentale hydrologique est : $Q = P - E$



Régime transitoire :

Les sorties ne sont pas égales aux entrées sur un temps donné : il faut tenir compte des vitesses des phénomènes et des effets de stockages qu'ils engendrent.



L'équation devient compliquée car elle est difficile à paramétrier :

Recours aux schémas conceptuels ou à la statistique pour représenter, simuler, prévoir

IV. Le bilan hydrique du sol

P = 100 mm
ETP = 40 mm

ETR = ?

ETR = ETP = 40 mm

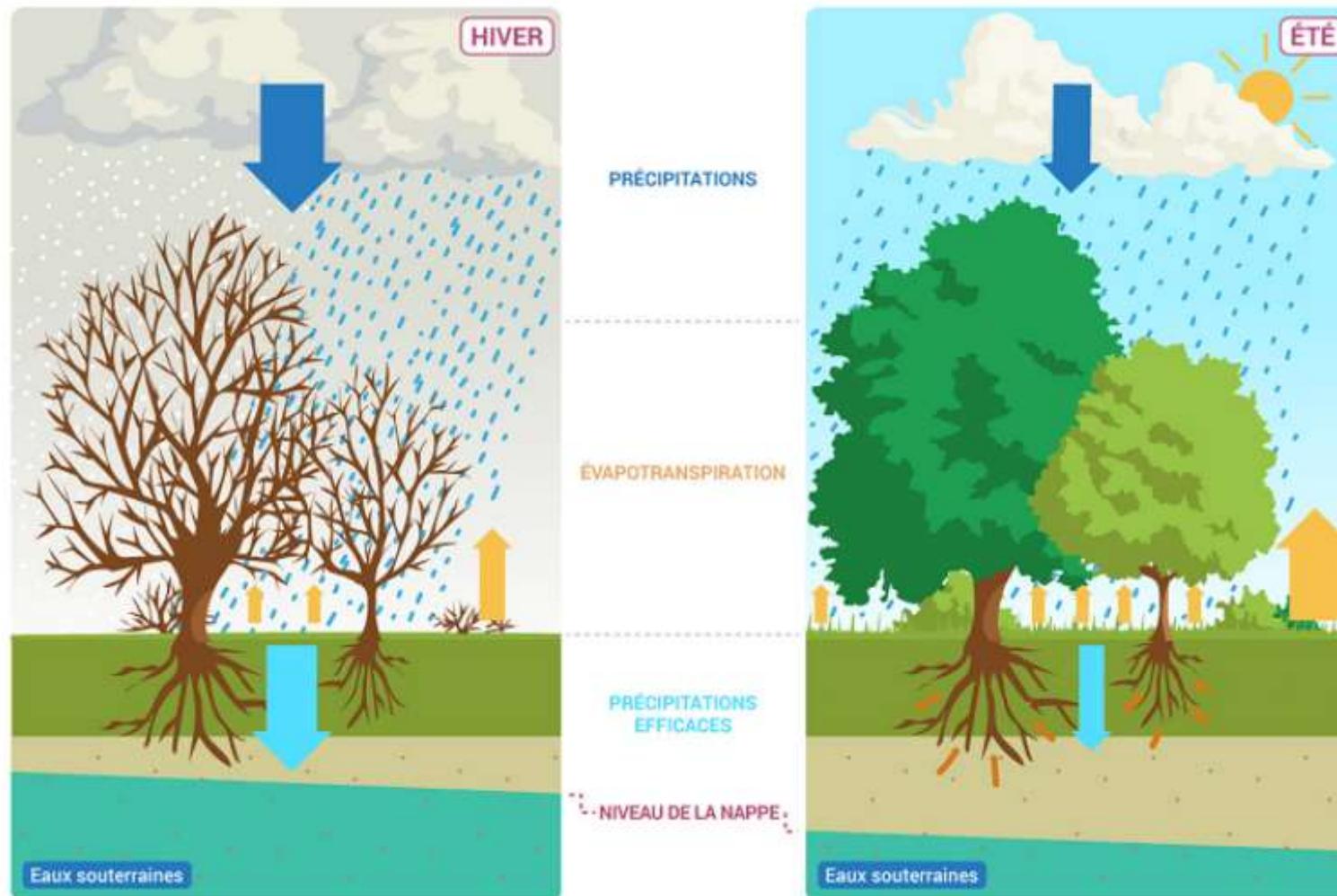
P = 100 mm
ETP = 120 mm

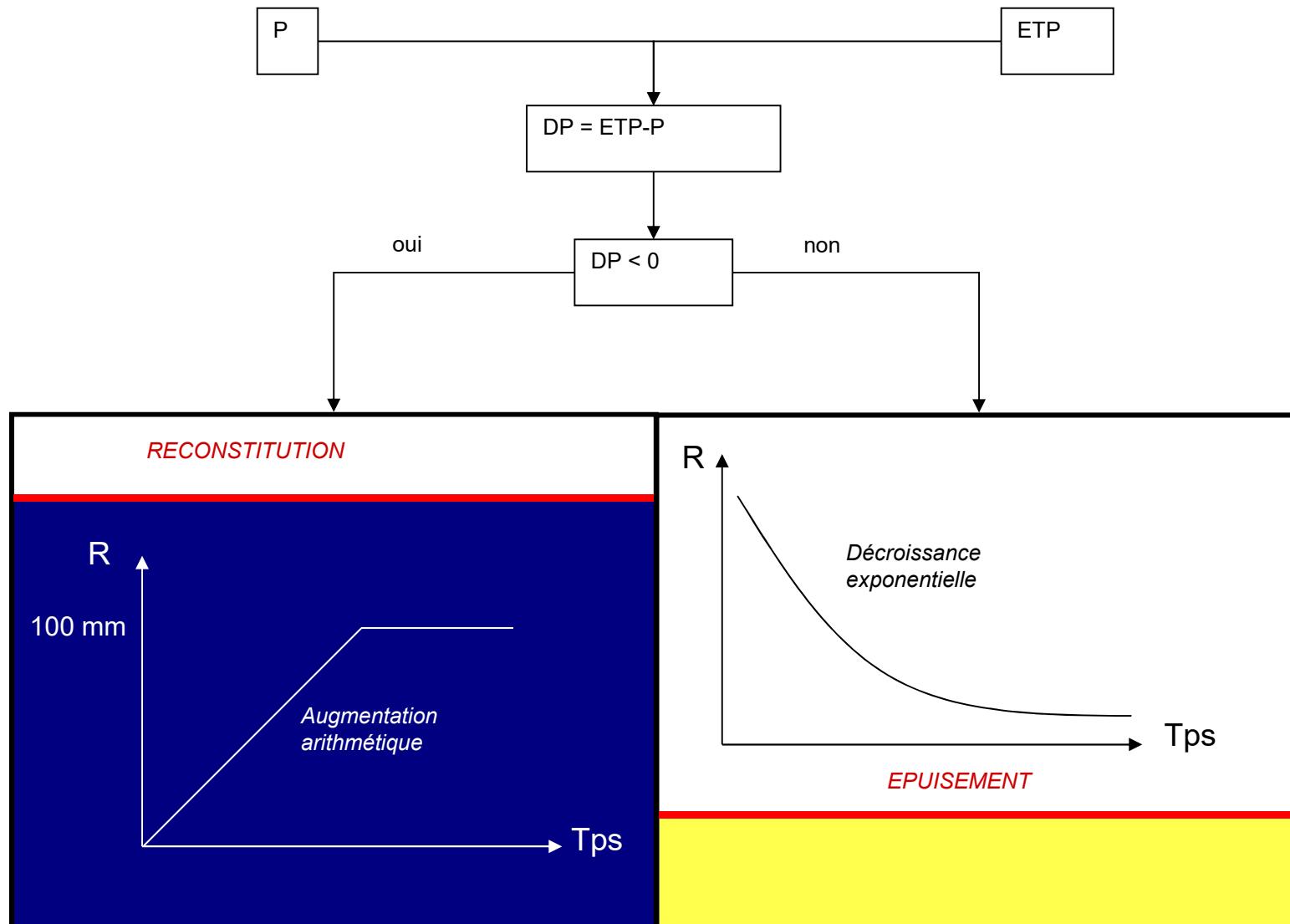
ETR = ?

ETR = 100 mm
MANQUE : 20 mm
Prélèvement dans la RU

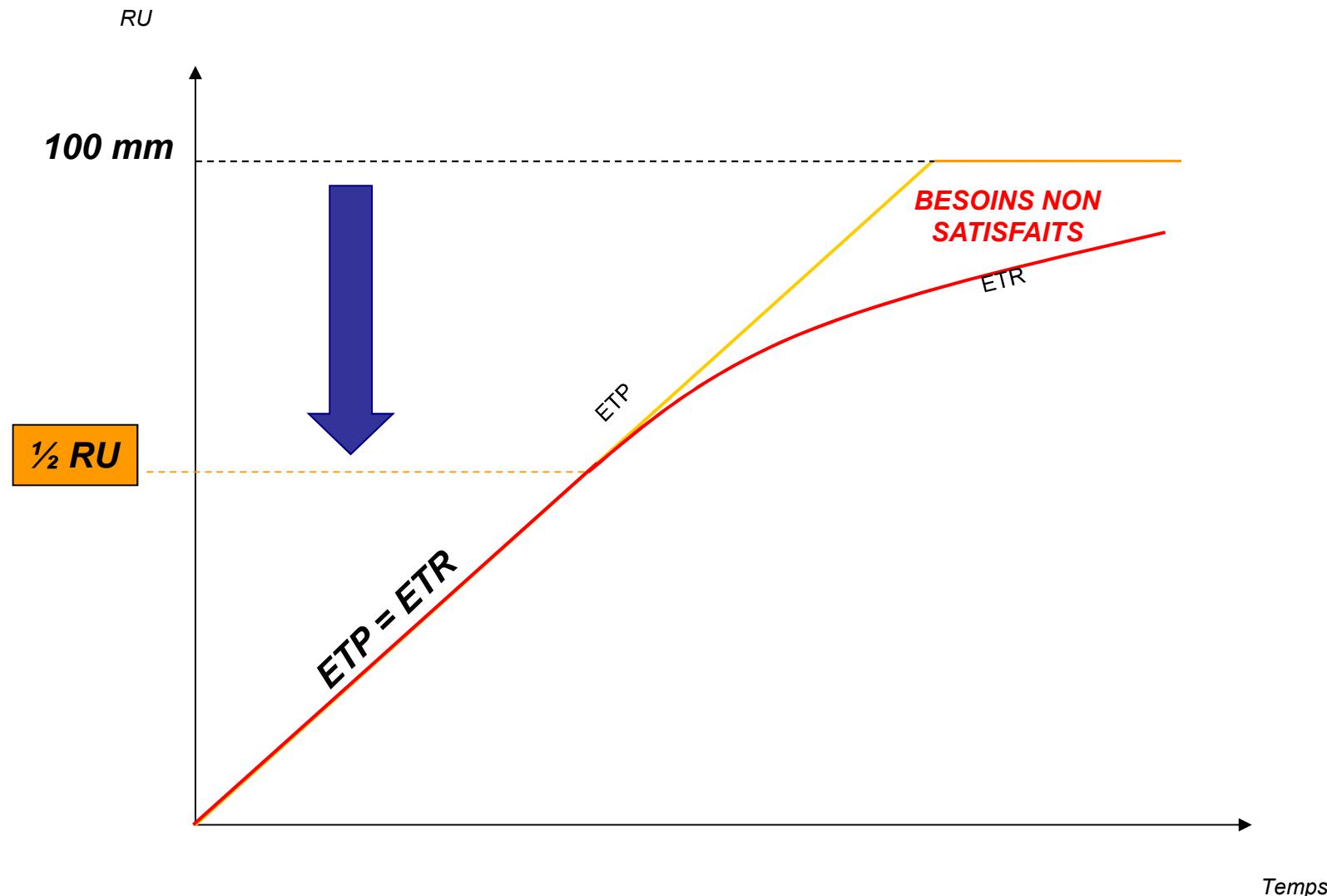
IV. Le bilan hydrique du sol

Pour un même volume de pluie tombant en un point donné, la part de précipitations efficaces n'est cependant pas la même selon les saisons. Maximale en hiver lorsque la végétation est absente ou dénuée de feuillage, elle est beaucoup plus faible en été par fortes chaleurs et avec une végétation développée. Cela explique qu'en métropole les précipitations hivernales soient les plus importantes pour la recharge des nappes souterraines.





L'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle



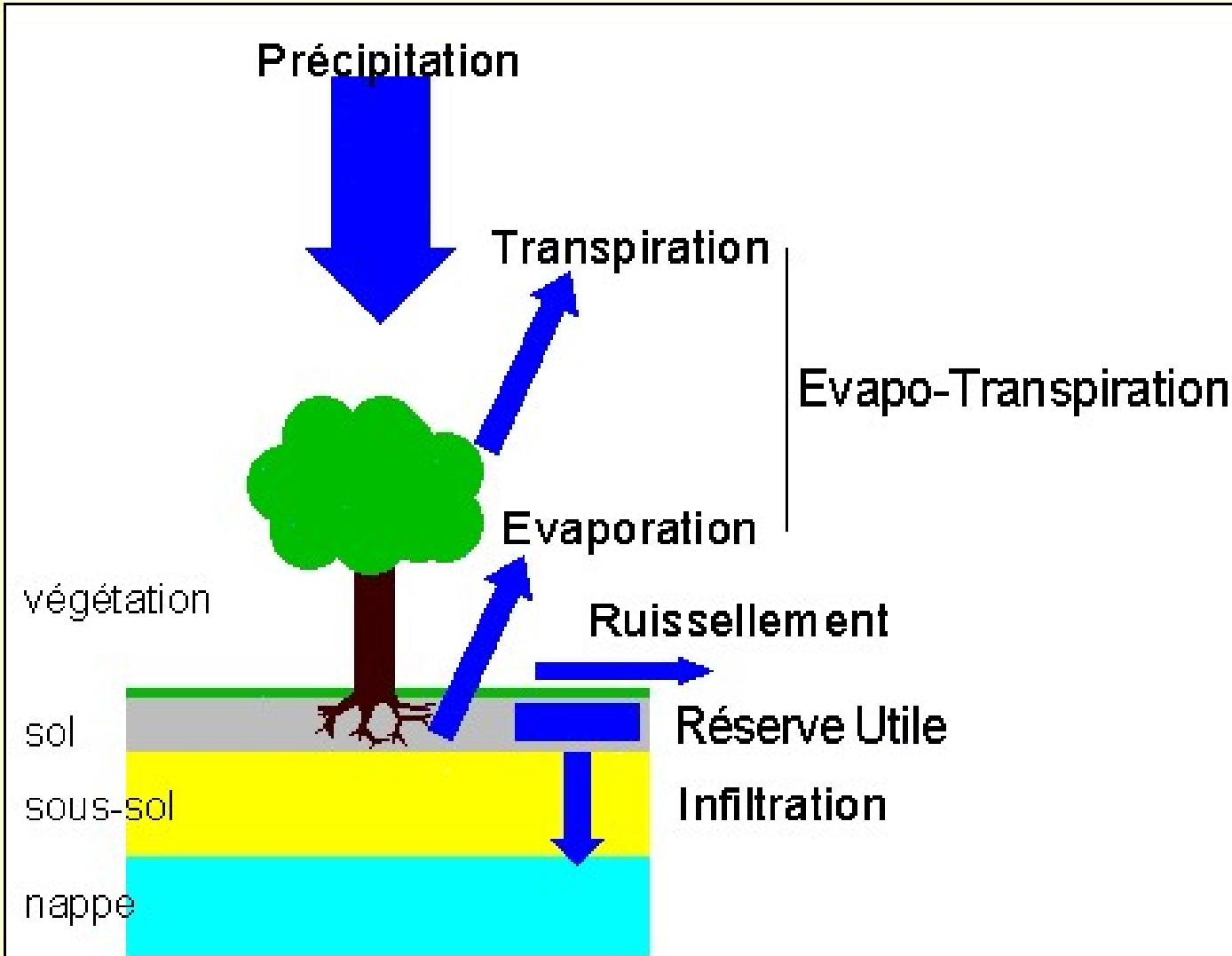


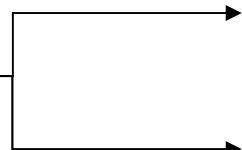
Figure 10: place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau

V. Le bilan hydrologique

Un modèle conceptuel qui représente les flux dans le bassin versant

❖ L'évapotranspiration

Passage de la phase liquide à la phase vapeur. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.



ETP : Quantité max. d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.

ETR : Evapotranspiration réelle.

❖ Les précipitations

Produits, sous forme liquide ou solide, de la condensation de la vapeur d'eau tombant des nuages ou déposés par l'air humide.

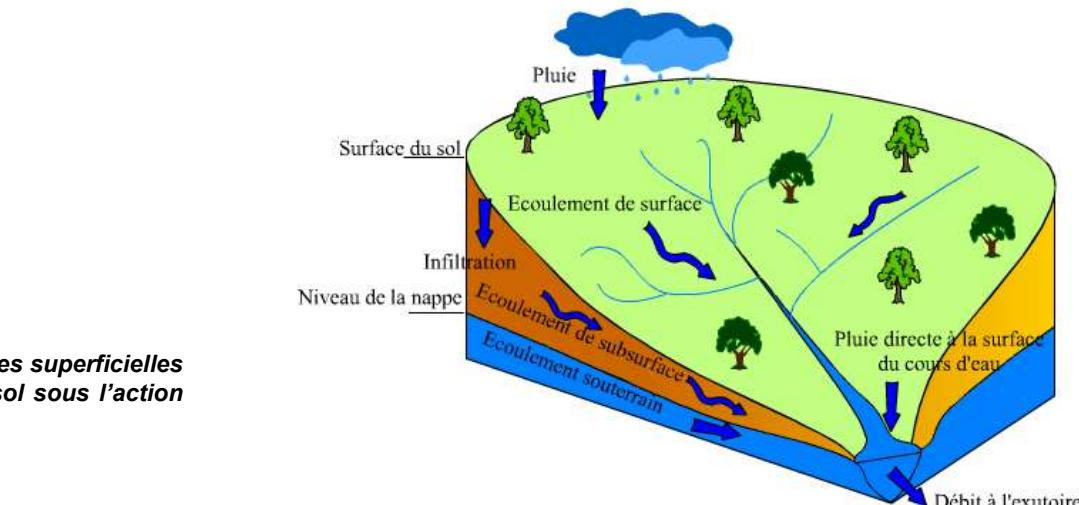
❖ L'infiltration :

Mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol sous l'action de la gravité et des effets de pression.

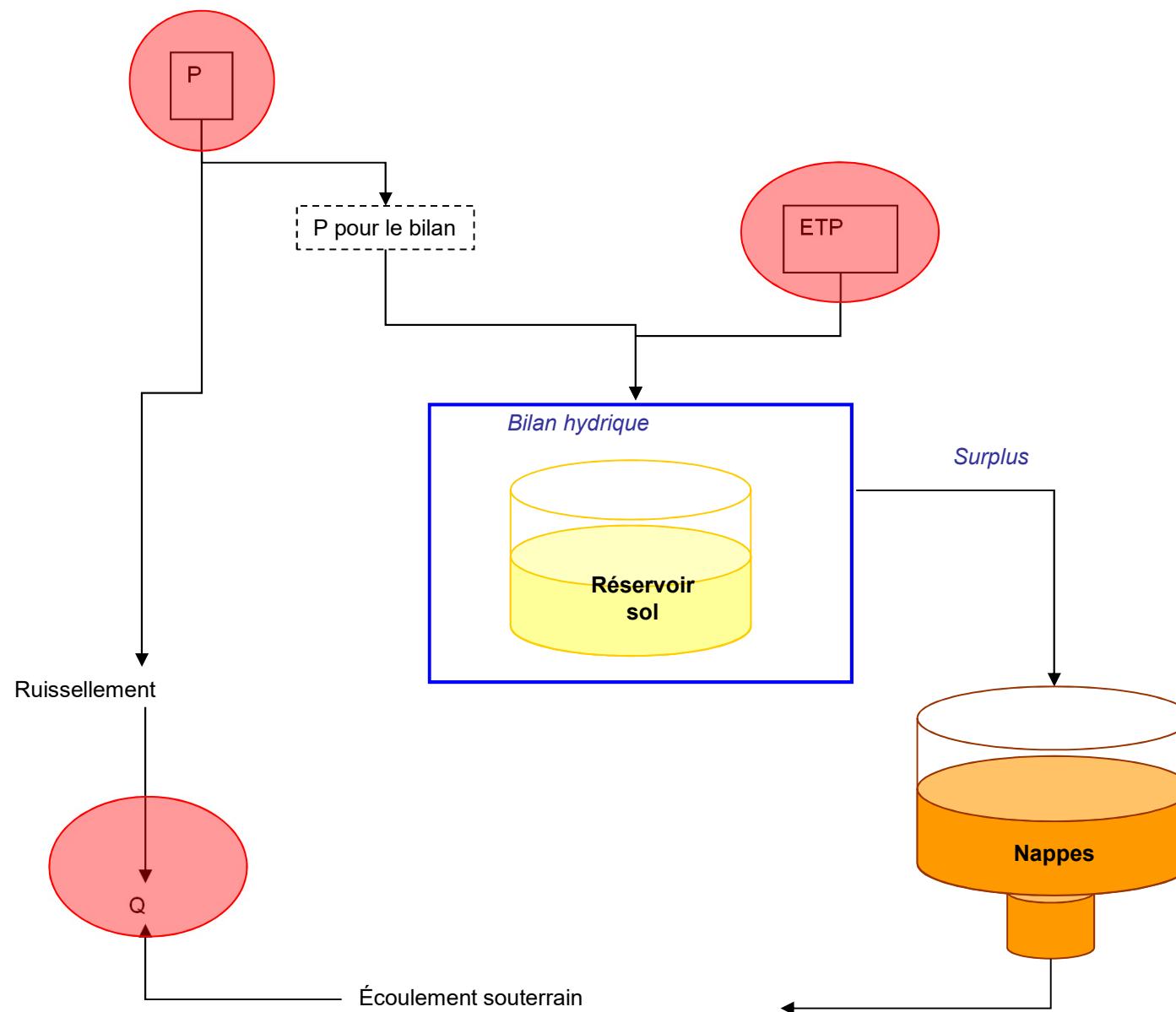
❖ La percolation

Infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique.

❖ Les écoulements



Algorithme du modèle de bilan hydrologique proposé : ORCHY



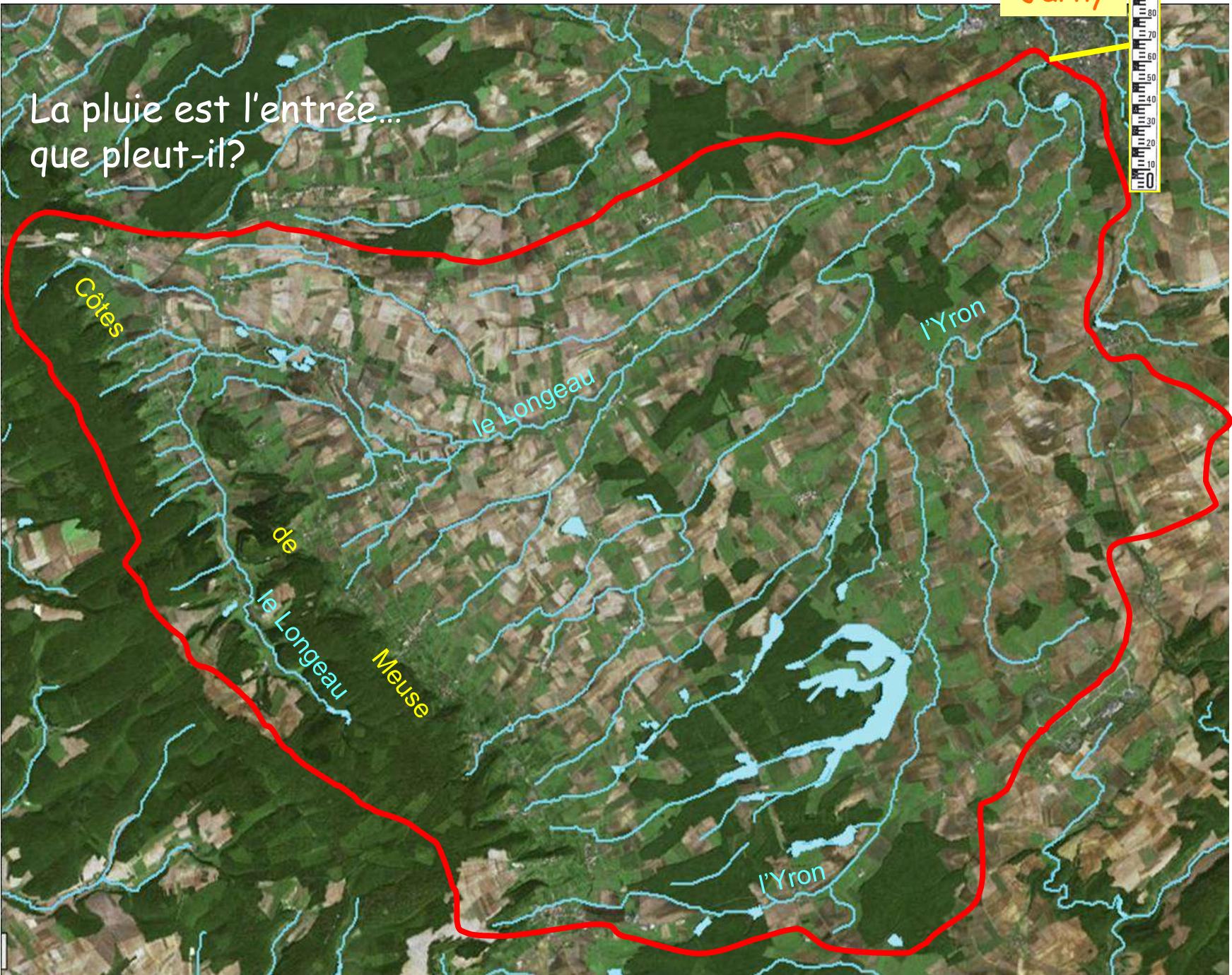
VI. Estimer les termes du bilan hydrologique

1. La pluie moyenne de bassin versant
2. Le coefficient d'écoulement de crue
3. Le coefficient de tarissement ou de vidange des nappes

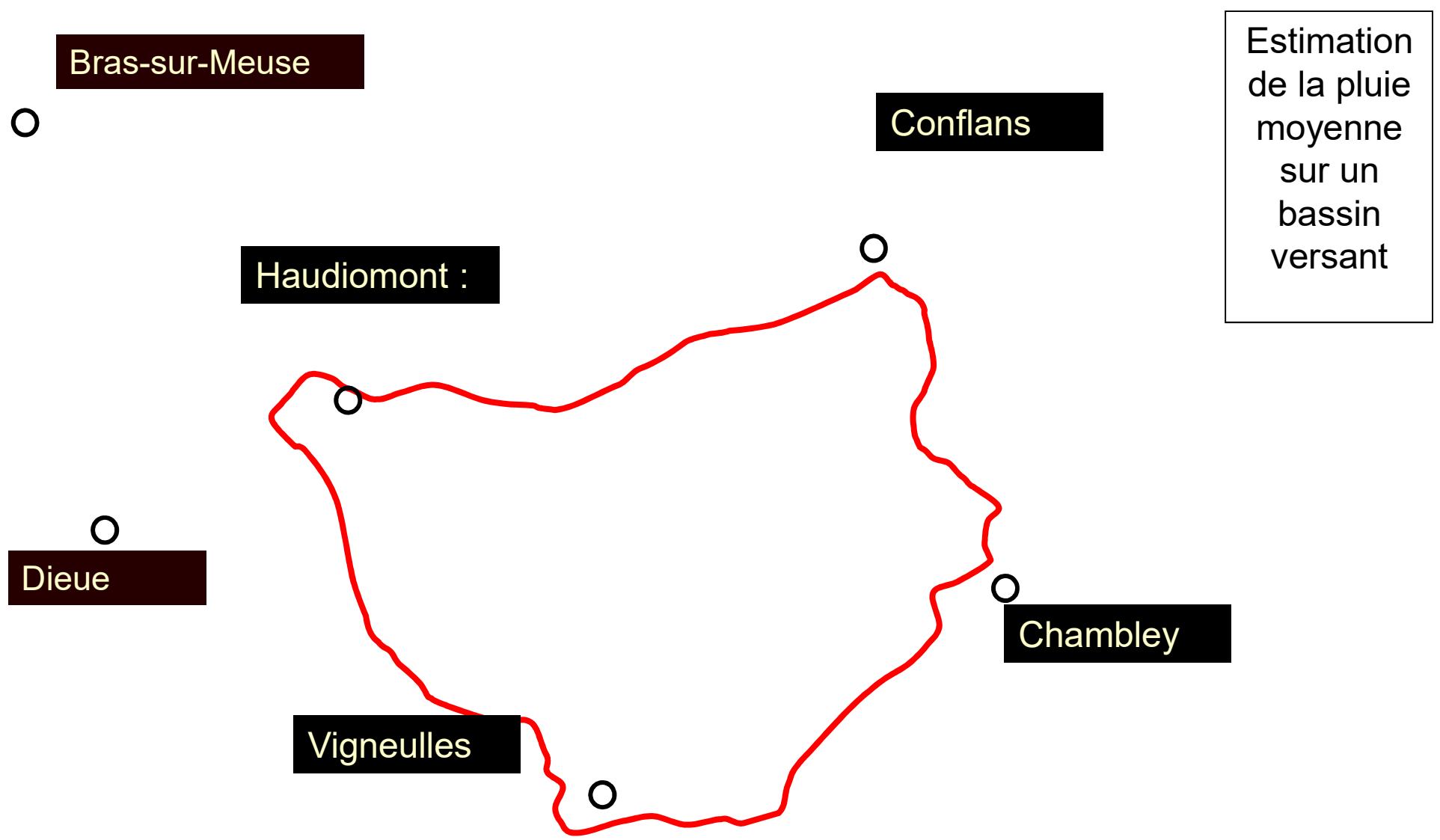
L'Yron à Jarny 383 km²

Jarny

E
80
70
60
50
40
30
20
10
0



1. La pluie moyenne de bassin versant

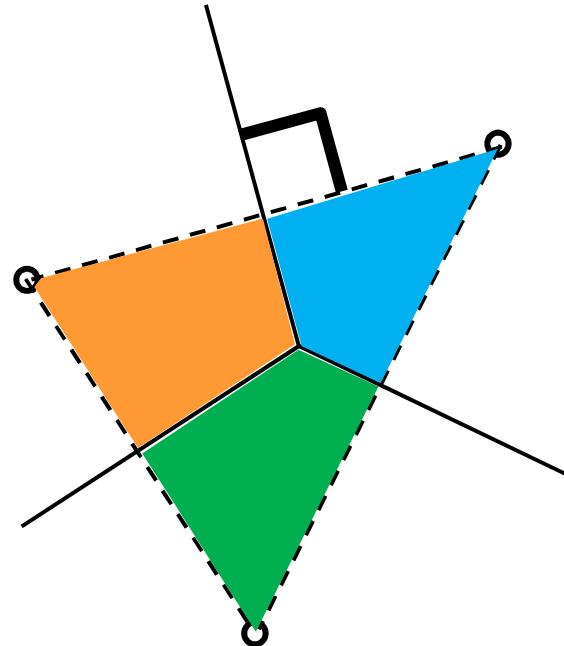


La pluie moyenne

La méthode de Thiessen pondère le montant d'un poste pluviométrique par la part de la surface de BV qui lui est affectée **par proximité**

Pluie moyenne bassin :

$$\sum p_i \times a_i$$



Construction :

- Prendre les postes 3 par 3, par triangles de proximité, tirer les distances entre les 3 postes
- Tracer les médiatrices (la médiatrice coupe perpendiculairement un segment en son milieu) – rappel : les 3 médiatrices d'un triangle sont concourantes en un seul point
- Par triangle, 3 surfaces sont ainsi déterminées délimitant les aires « d'influence » de chaque sommet **par proximité**

O

Bras-sur-Meuse

Polygones
de
Thiessen

Conflans

Haudiomont :

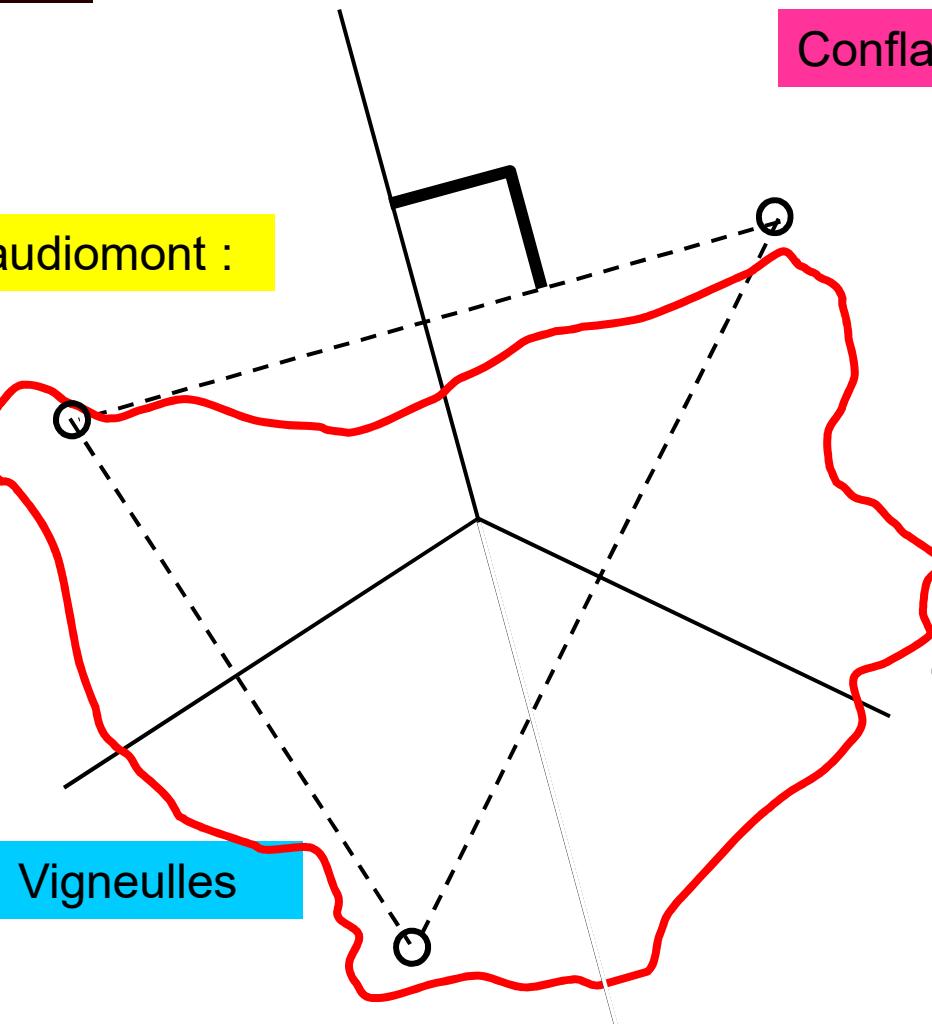
O

Dieue

O

Chambley

Vigneulles



construction :

- considérer un triangle ;
- prendre le milieu de la distance entre 2 postes, tracer la médiatrice (rappel : angle droit !)
- répéter pour les autres côtés : les 3 médiatrices d'un triangle sont concourantes en un point

Polygones
de
Thiessen

Bras-sur-Meuse
○ 1045 mm

Conflans
770 mm

Haudiomont :
980 mm

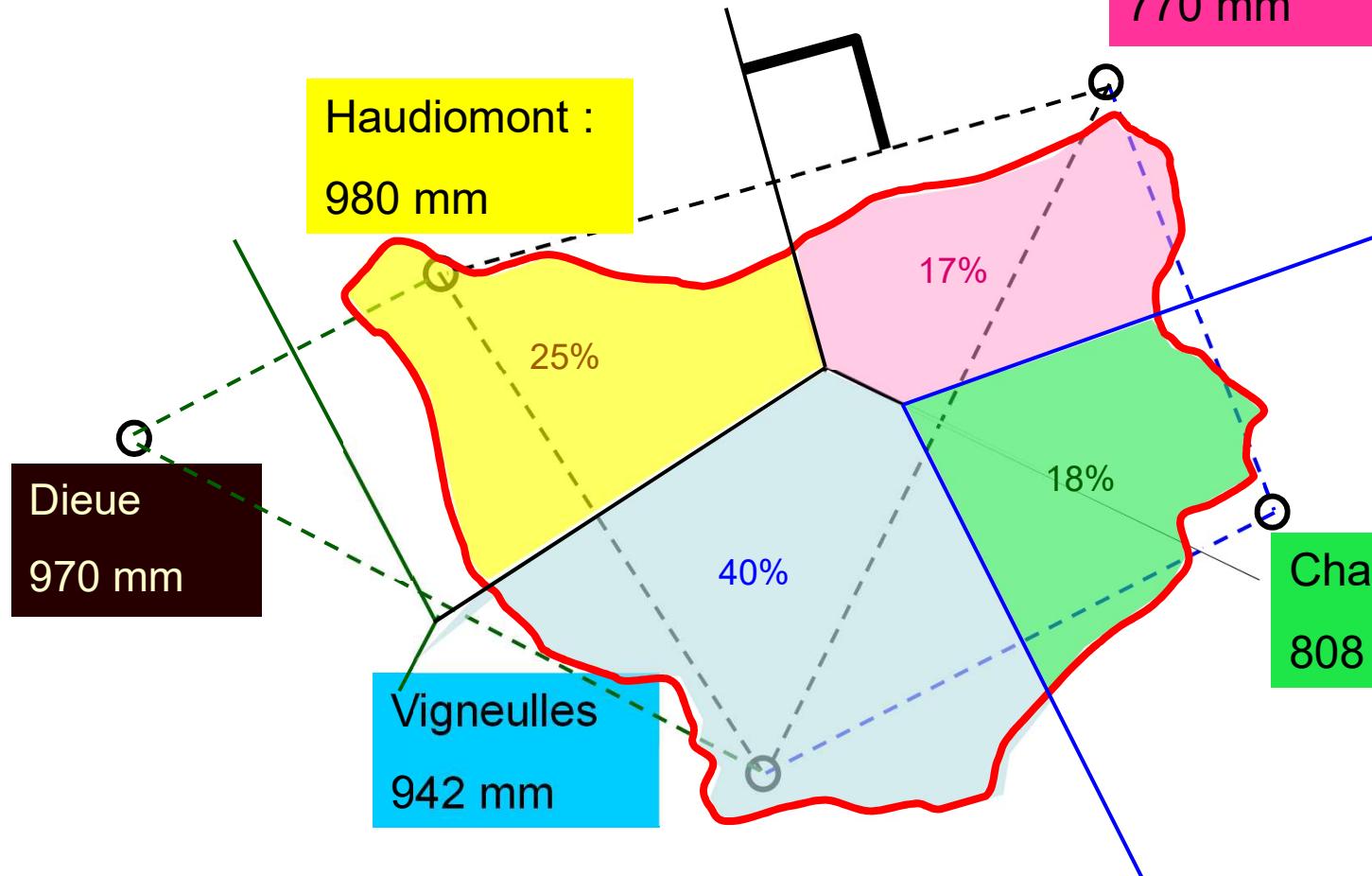
Dieue
970 mm

Chambley
808 mm

Vigneulles
942 mm

construction :

- Procéder de la même manière avec les autres triangles ;
- Identifier les polygones de Thiessen dans les limites du bassin
- Estimer les superficies



La méthode de Thiessen pondère le montant d'un poste pluviométrique par la part de la surface de BV qui lui est affectée **par proximité**
 Elle ne nécessite que de connaître les coordonnées des postes pluviométriques

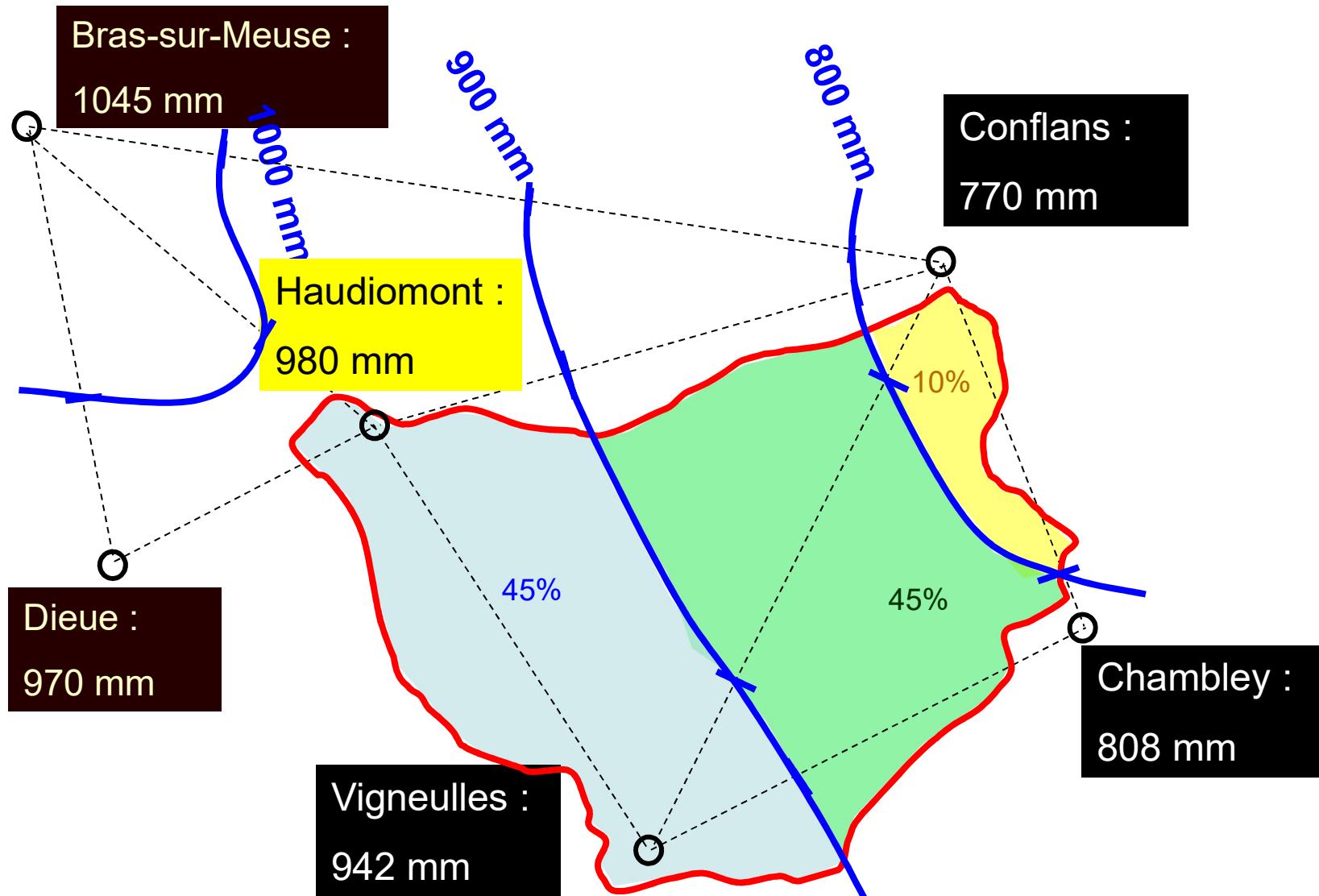
$$\text{pluie moyenne bassin} = \sum p_i \times a_i$$

précipitations moyennes bv	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.		part
Vigneulles	93	79	78	64	64	73	72	64	72	96	80	107	942	0,40
Haudiomont	97	77	88	66	66	75	72	64	78	101	83	113	980	0,25
Conflans	67	55	62	55	55	64	68	51	66	76	70	81	770	0,17
Chambley	68	58	68	58	59	70	68	54	68	80	71	86	808	0,18
précipitations														

$$\text{Calcul: } = \sum p_i \times a_i = 942 \times 0,40 + 980 \times 0,25 + 808 \times 0,18 + 770 \times 0,17 = 898 \text{ mm}$$

(b)

isohyètes



construction :

- graduer la distance entre 2 postes en fonction de l'écart pluviométrique entre les 2 postes

- Secteur <800mm (moyenne = 770+800)/2 = 785mm x 10%

Secteur 900-800 mm = 850mm x 45%

- Secteur >900mm (moyenne = ((980+942)/2+900)/2 = 930mm x 45%

moyenne BV = 880 mm

La pluie moyenne résumé

La méthode de Thiessen ne nécessite que de connaître les coordonnées des postes pluviométriques

$$\text{Calcul: } = \sum p_i \times a_i = 942 \times 0,40 + 980 \times 0,25 + 808 \times 0,18 + 770 \times 0,17 = \mathbf{898 \text{ mm}}$$

a = aire du polygone p = précipitations au poste

La méthode des isohyètes nécessite de refaire une carte pour chaque mois (chaque pas de temps)

On peut utiliser un logiciel d'interpolation (type « surfer »)

Pour l'année moyenne :

$$\text{Calcul pour l'année moyenne : } = \sum p_i \times a_i = 930 \times 0,45 + 850 \times 0,45 + 785 \times 0,10 = \mathbf{880 \text{ mm}}$$

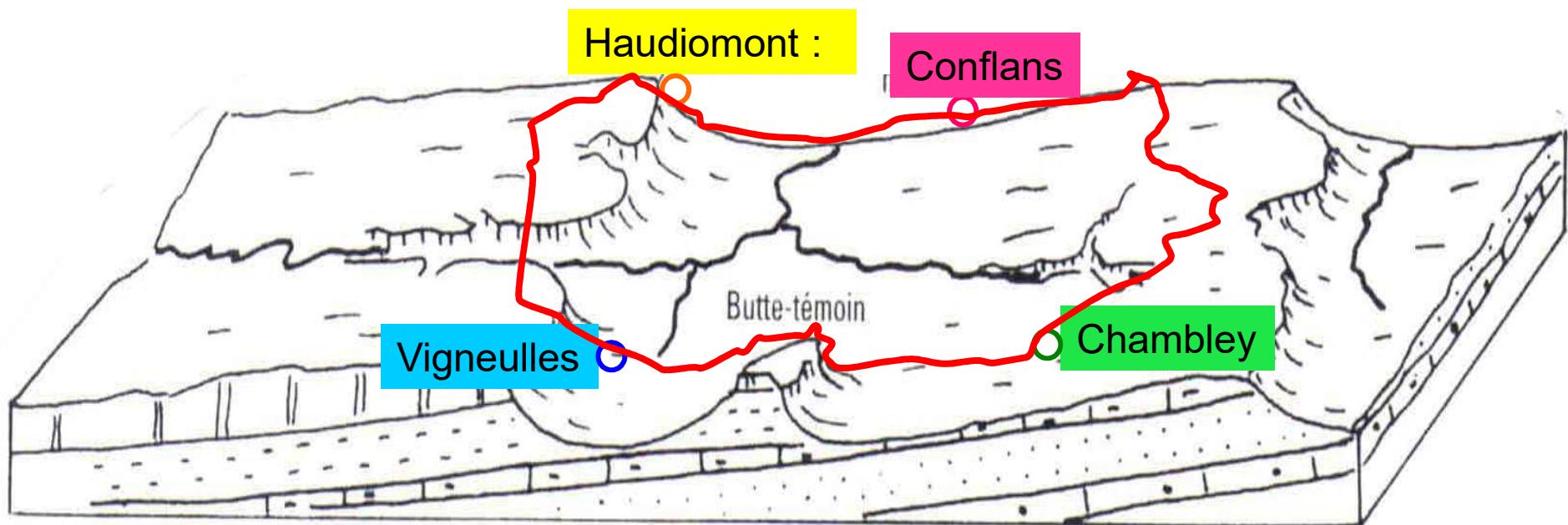
a = aire de la classe déterminée par 2 isohyètes p = précipitations moyennes de la classe

Y a-t-il une méthode « meilleure » ? la méthode des isohyètes satisfait davantage la raison (elle paraît plus scientifique) mais en pratique les 2 méthodes donnent des résultats très proches, du fait de l'interpolation linéaire pour les isohyètes.

Météo-France utilise un interpolateur qui fait intervenir une autre variable : l'altitude environnant le poste .

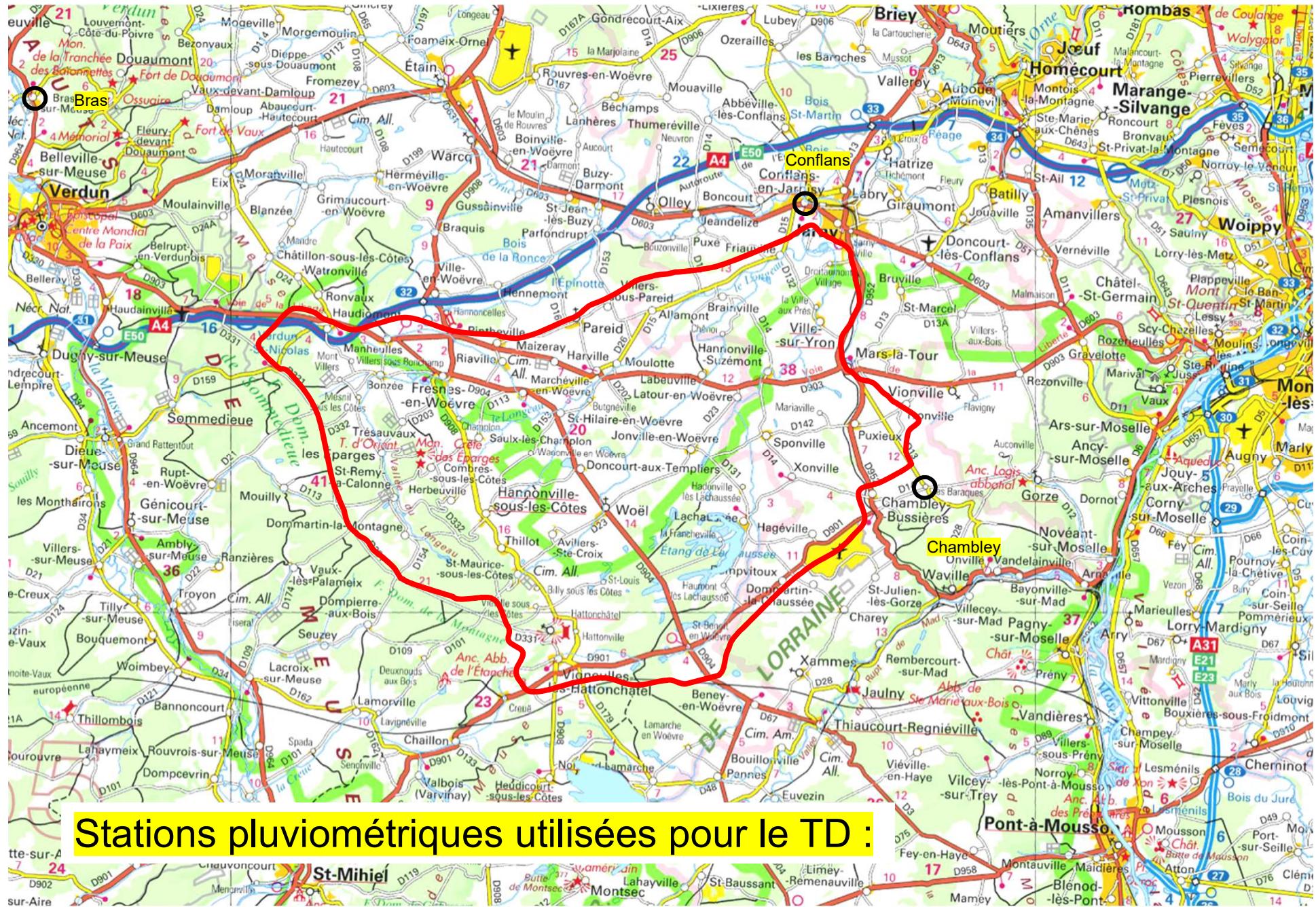
Si on considère que l'altitude augmente les précipitations, les 2 méthodes surestiment la pluie moyenne en donnant trop de poids aux postes des Côtes de Meuse et pas assez à la plaine, dépourvue de poste à l'intérieur du BV.

La pluie moyenne : l'influence du relief

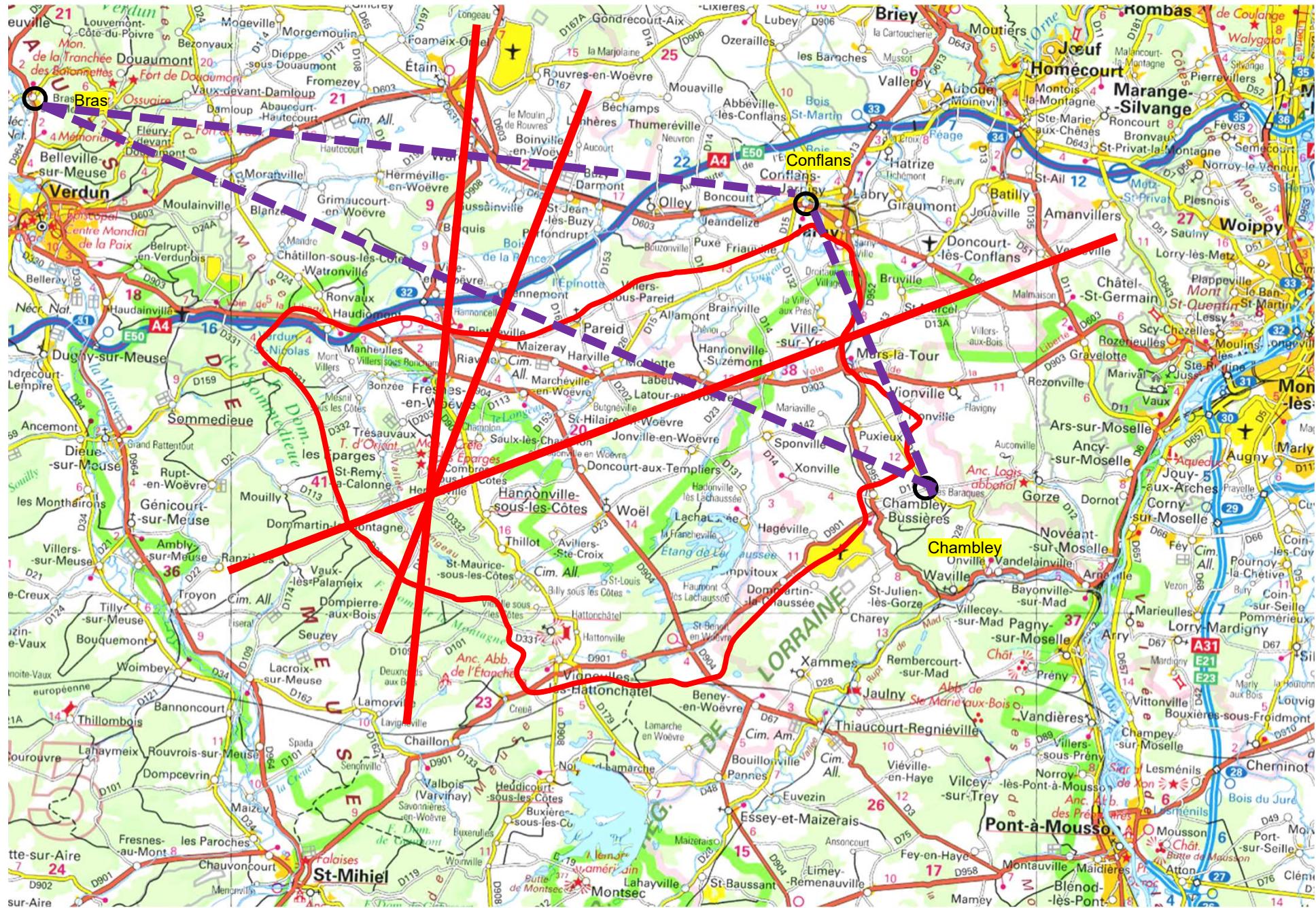


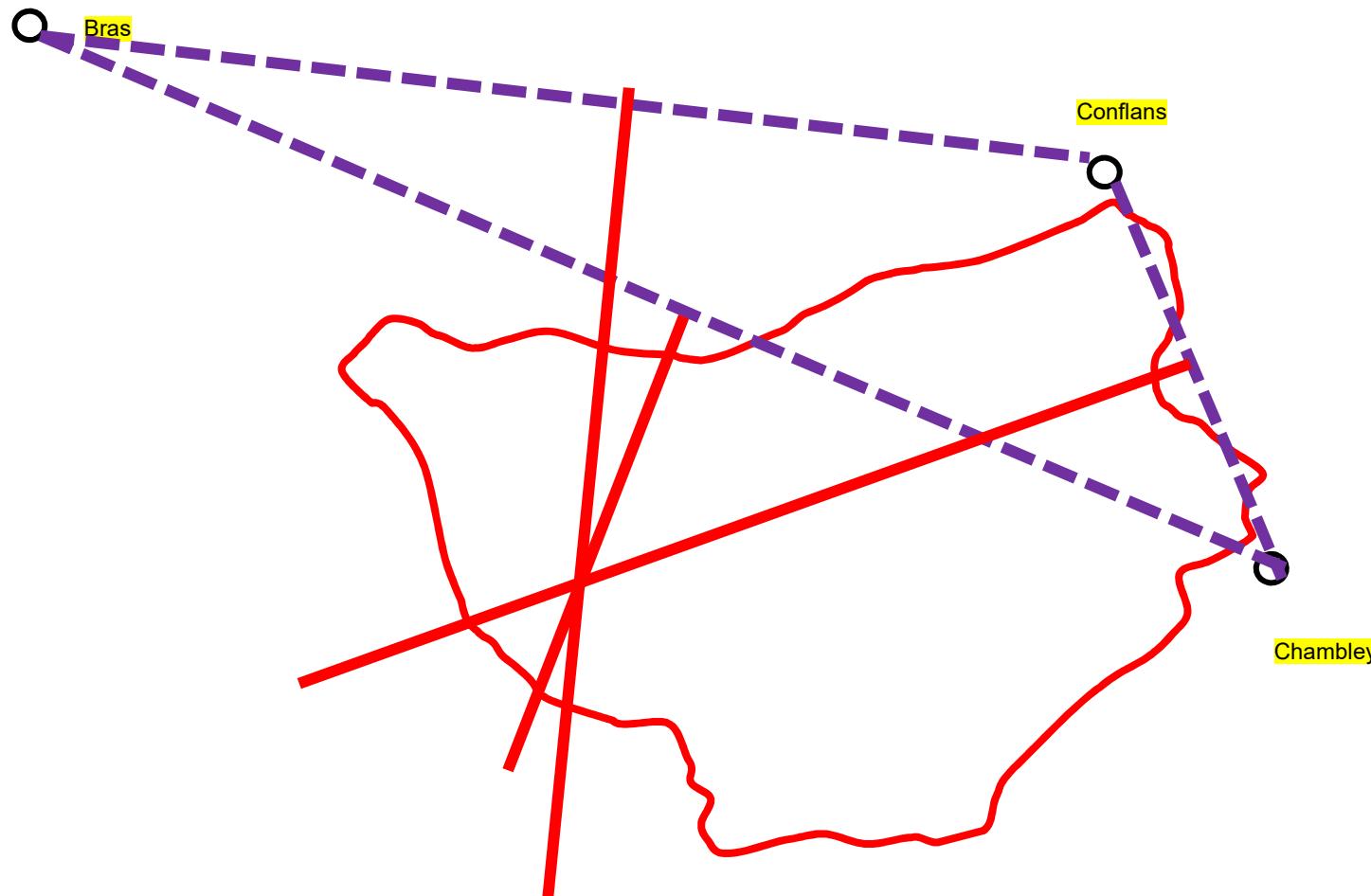
Si on considère que l'altitude augmente les précipitations, la méthode de Thiessen sur-évalue la pluie moyenne en donnant trop de poids aux postes des Côtes de Meuse

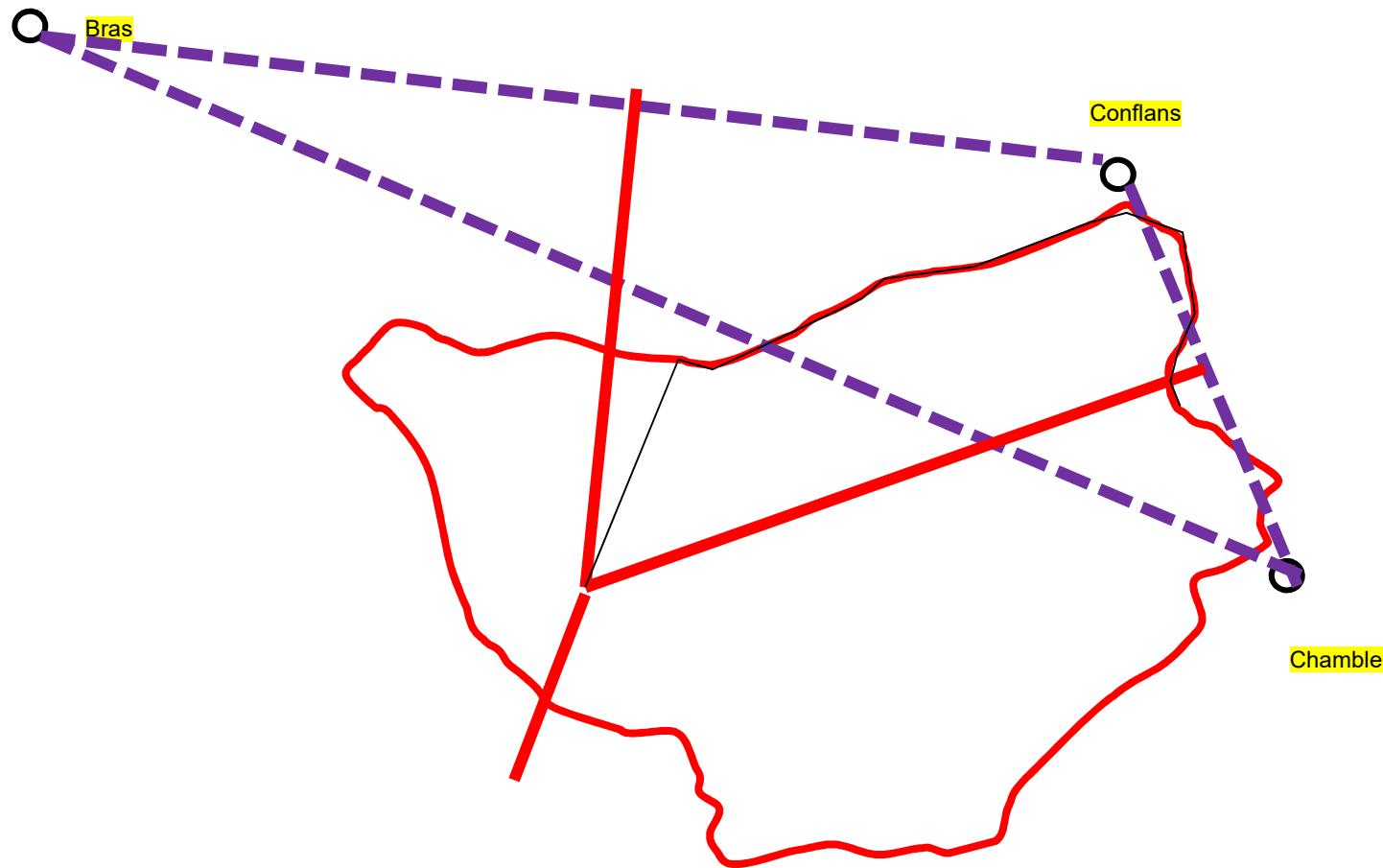
De même la méthode des isohyètes ne fait pas intervenir le relief

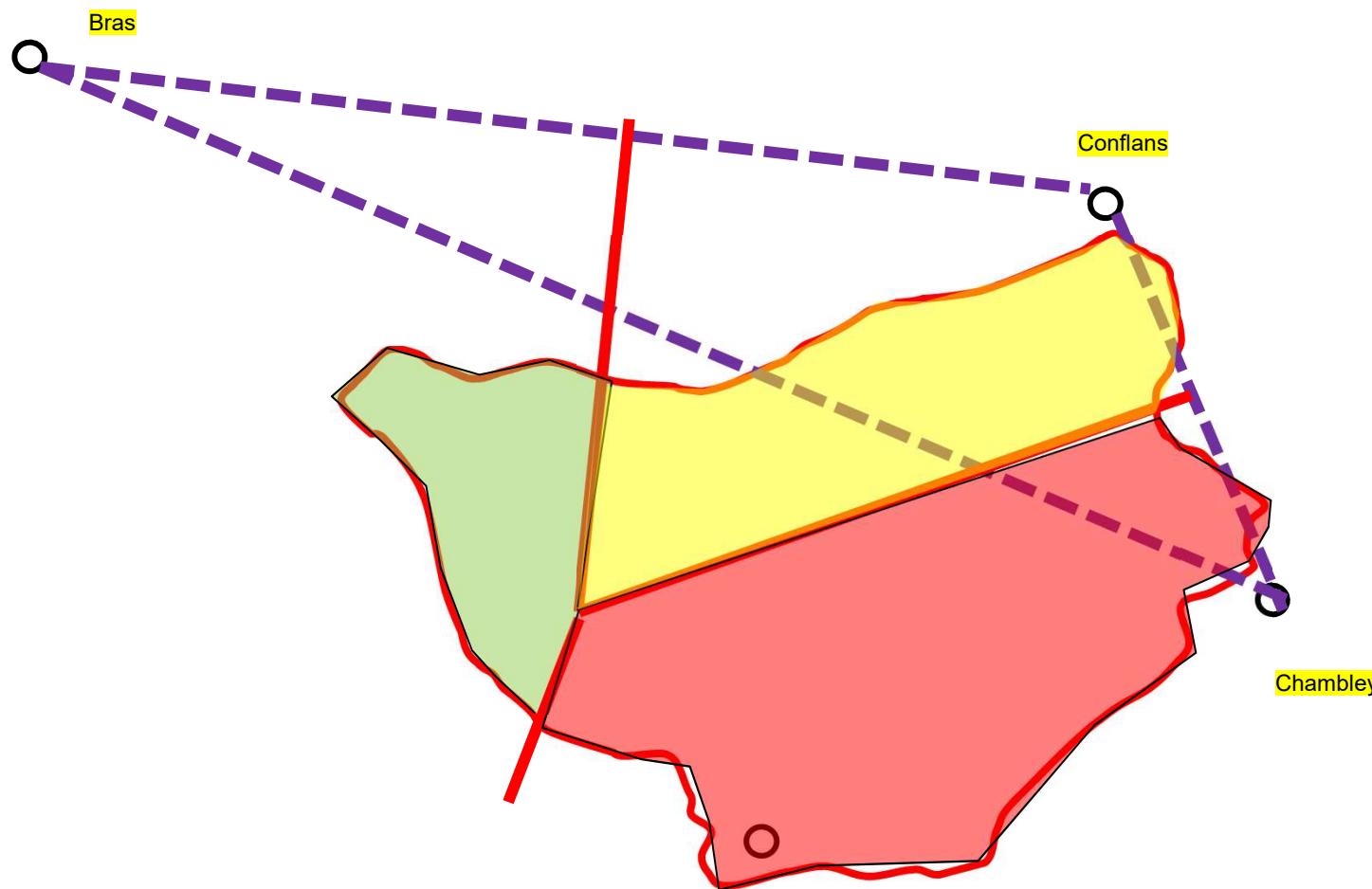


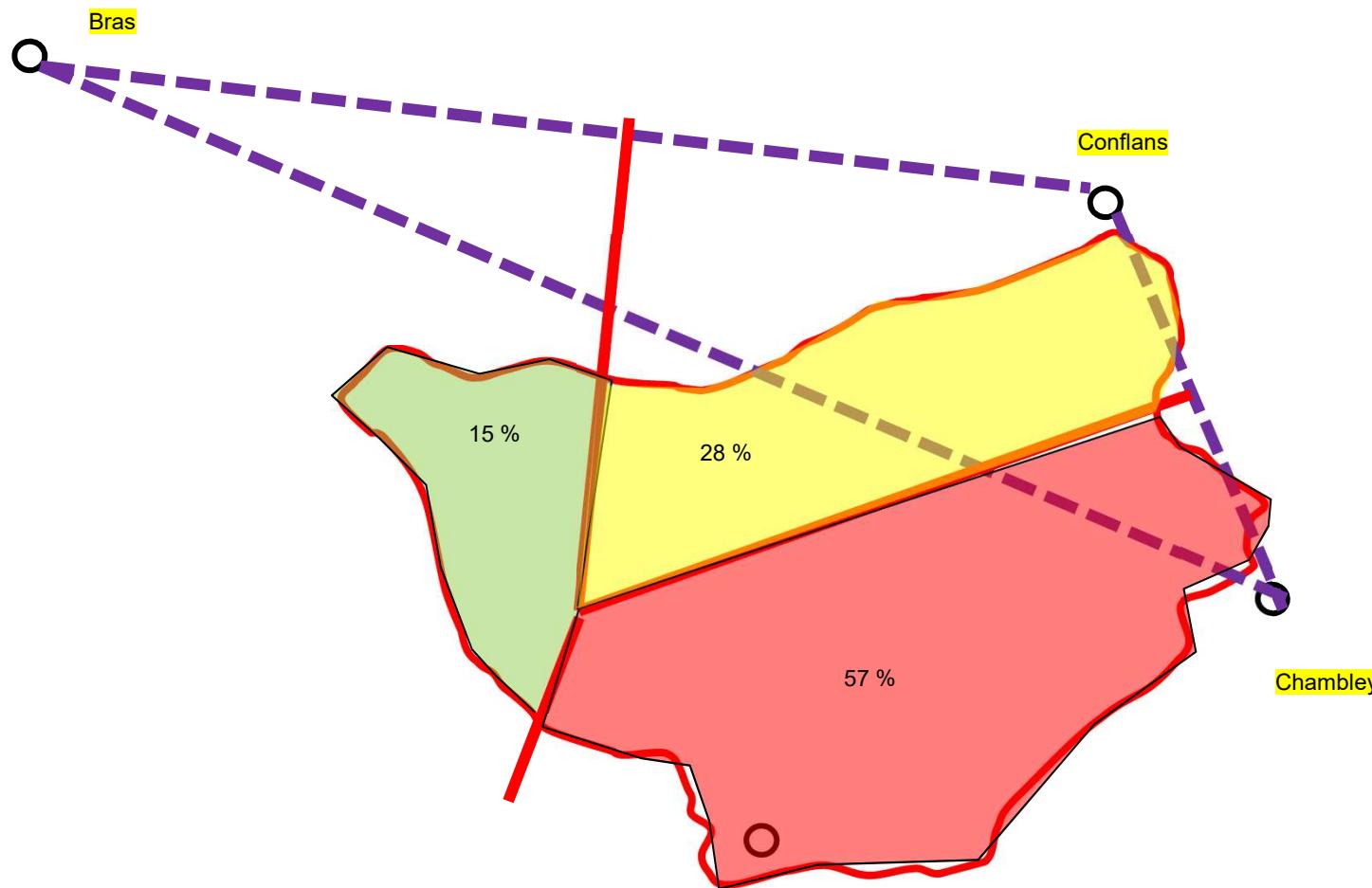












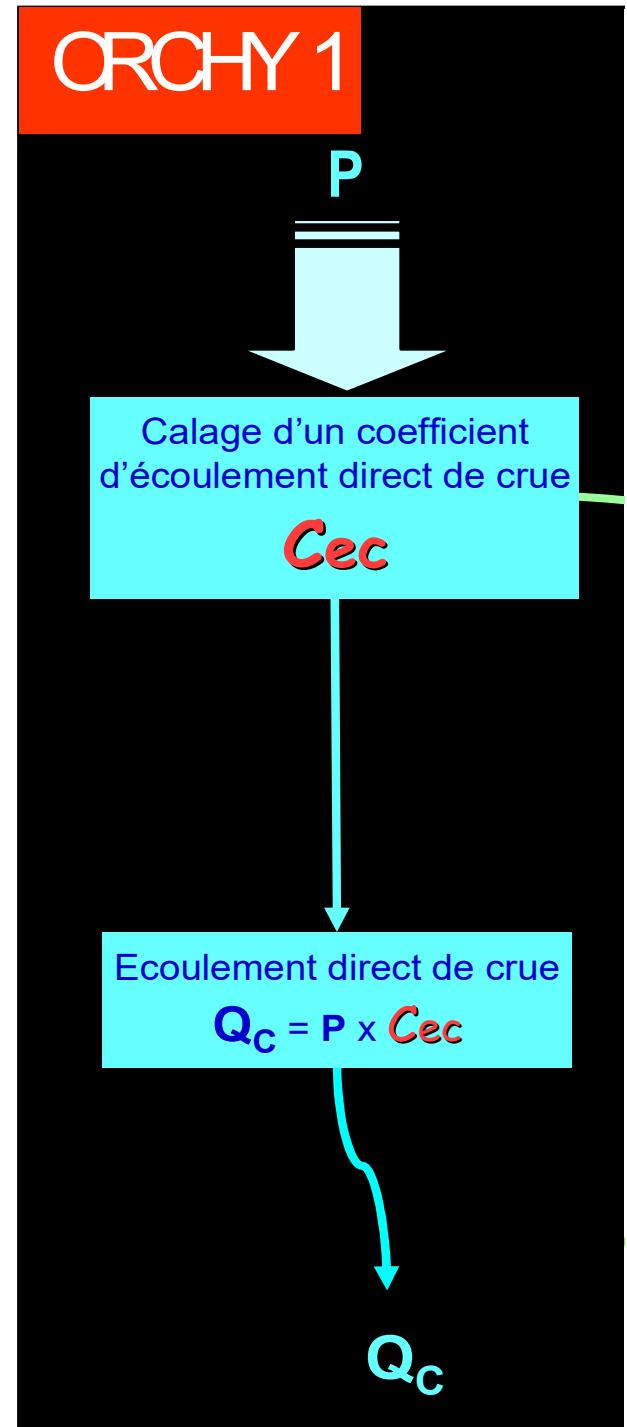
2. L'écoulement de crue

L'écoulement de crue peut être représenté par un coefficient d'écoulement de crue :

La pluie tombée va, pour partie, rejoindre rapidement la rivière sans profiter au sol ou à l'infiltration.

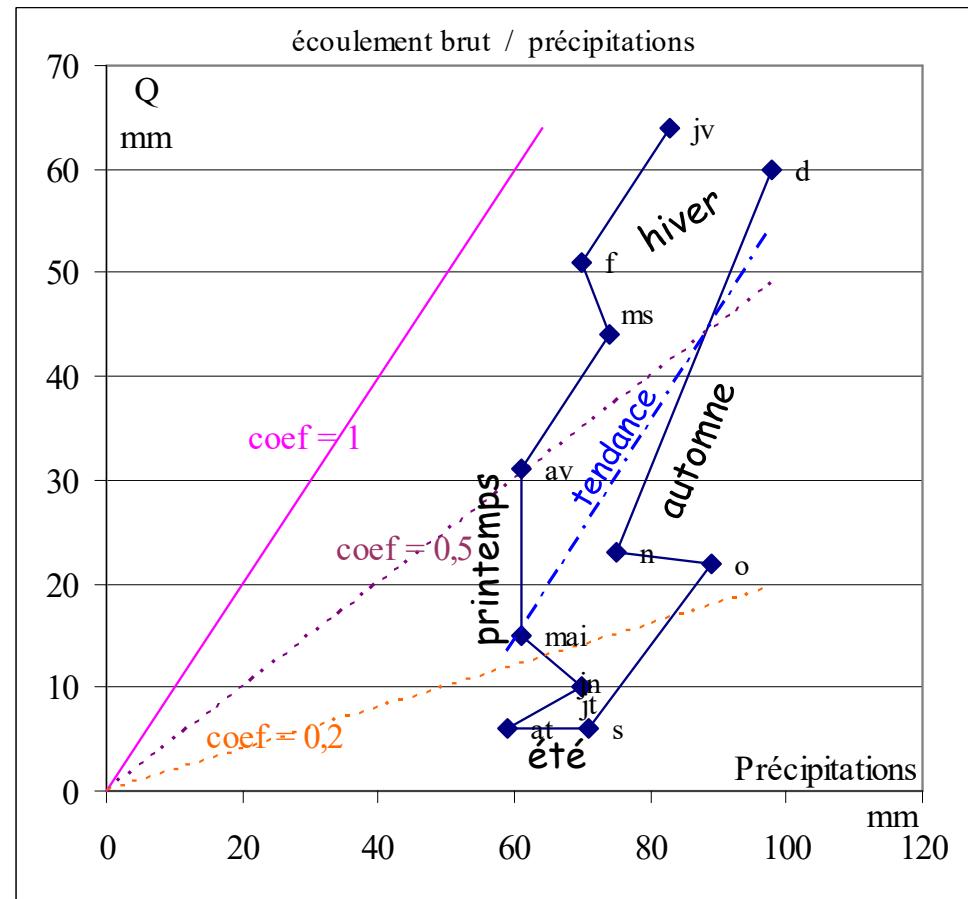
L'écoulement de crue est fonction de

- la saison : si l'ETP est conséquente, le sol s'assèche rapidement et est prêt à absorber les précipitations qui interviennent
- de la quantité d'eau précipitée : la part des précipitations retenues par le sol est limitée ; aussi, plus il pleut, plus l'écoulement direct est conséquent.



L'écoulement de crue : quelles valeurs ?

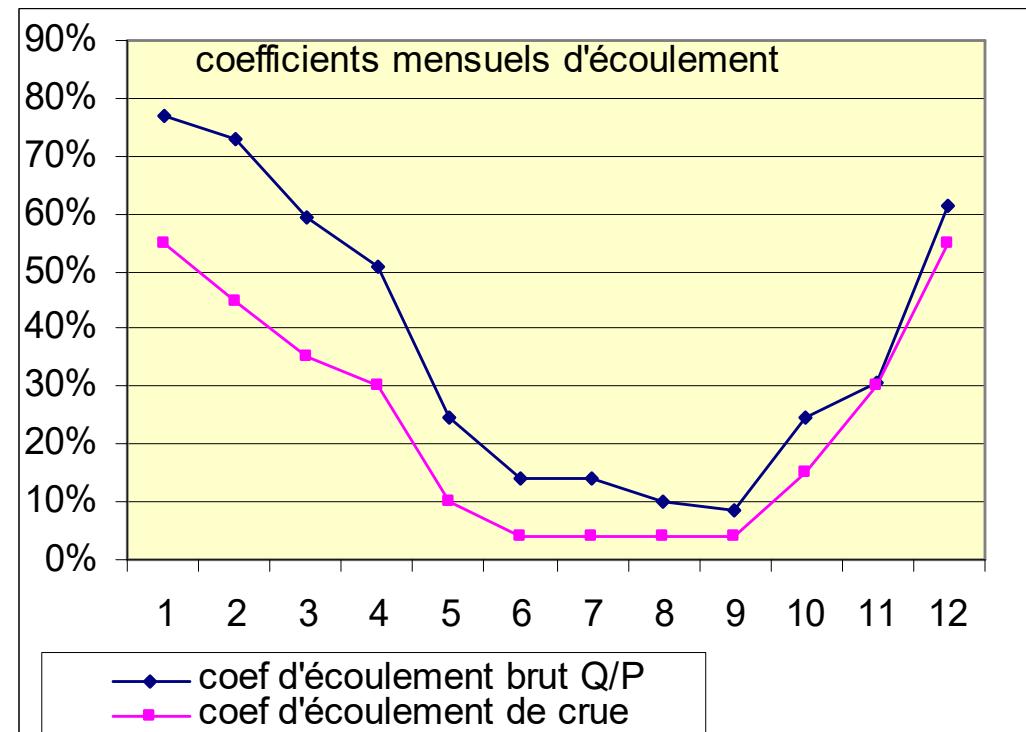
- D'abord on s'appuie sur les analyses d'hydrogrammes de crues ;
- ensuite, pour généraliser, on peut regarder ce que valent (graphique) les coefficients **bruts** mensuels Q/P (où Q intègre l'écoulement de base) ;
- les Cec sont donc plus faibles ;
- il existe une tendance $\text{coef} = f(P)$;
- mais la distribution s'organise **surtout selon la saison**



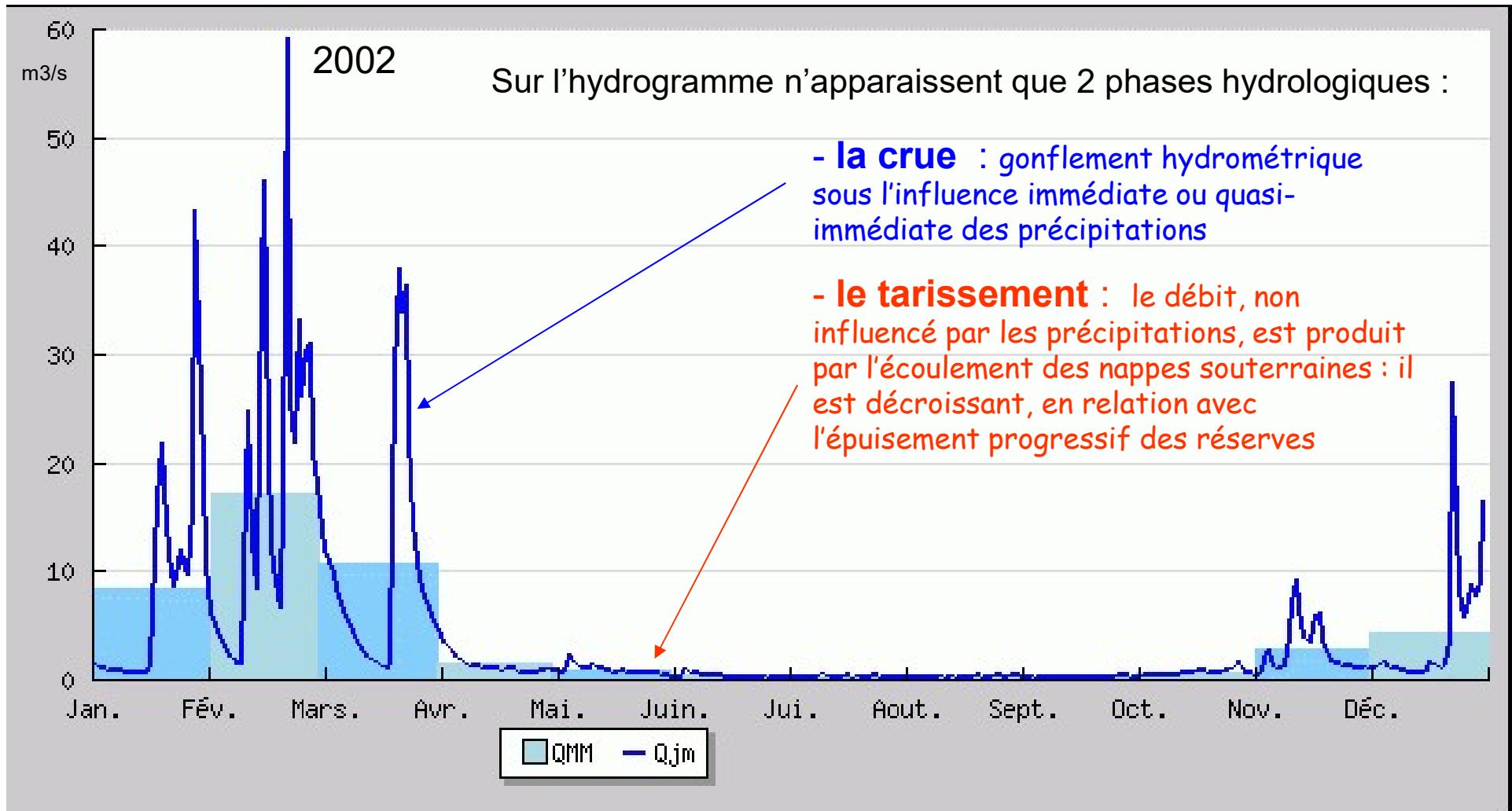
L'écoulement de crue quelles valeurs ?

Exemple de valeurs « standard », proposées pour l'Yron tenant compte des valeurs observées ponctuelles et de la saison, pour l'écoulement de crue :

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
CEC	0,55	0,45	0,35	0,30	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,15	0,30	0,55



Analyse des phases hydrologiques pour estimer l'écoulement de crue



écoulement annuel : débit moyen : 3.870 m³/s débit moyen spécifique : 10.10 l/s/km² lame d'eau : 319.0 mm

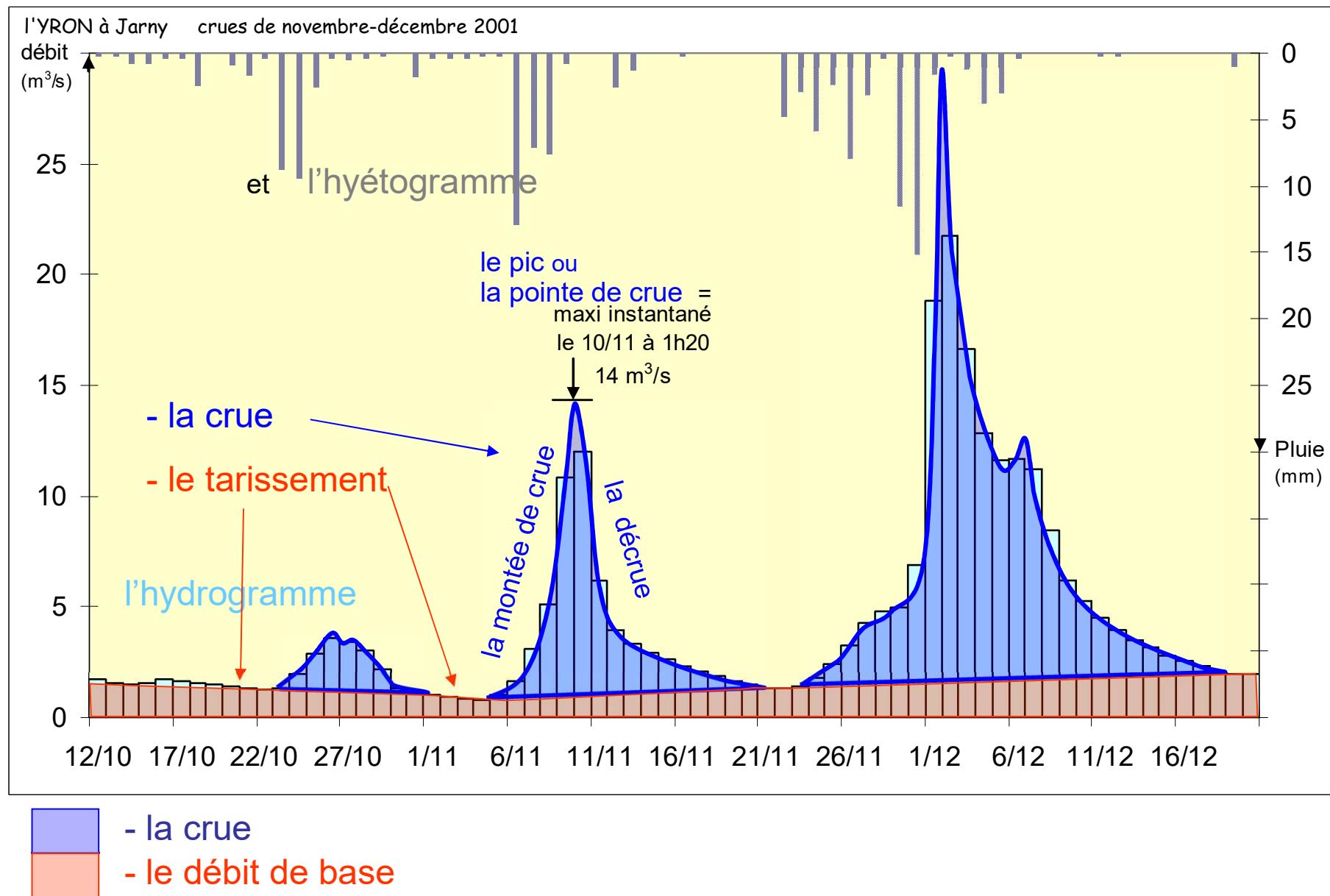
écoulement naturel reconstitué : débit moyen : 3.870 m³/s débit moyen spécifique : 10.10 l/s/km² lame d'eau : 319.0 mm

maximum instantané : débit : 76.40 m³/s Le 21/02/2002 à 05:21 hauteur : 257.0 cm Le 21/02/2002 à 05:21

source banque hydro

<http://www.hydro.eaufrance.fr/>

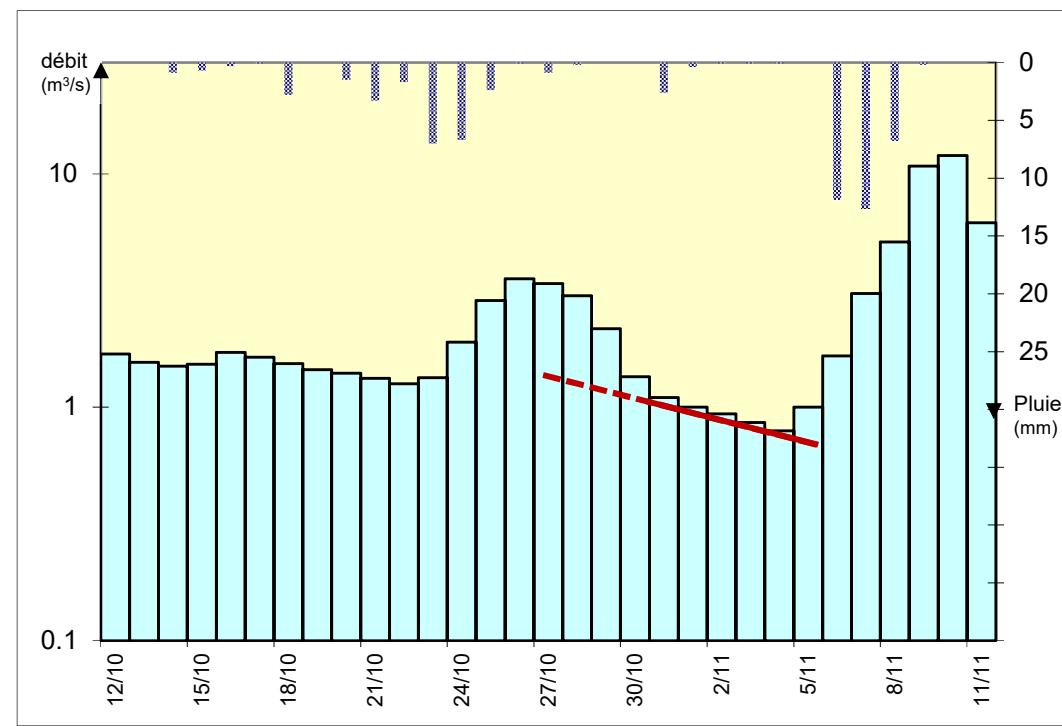
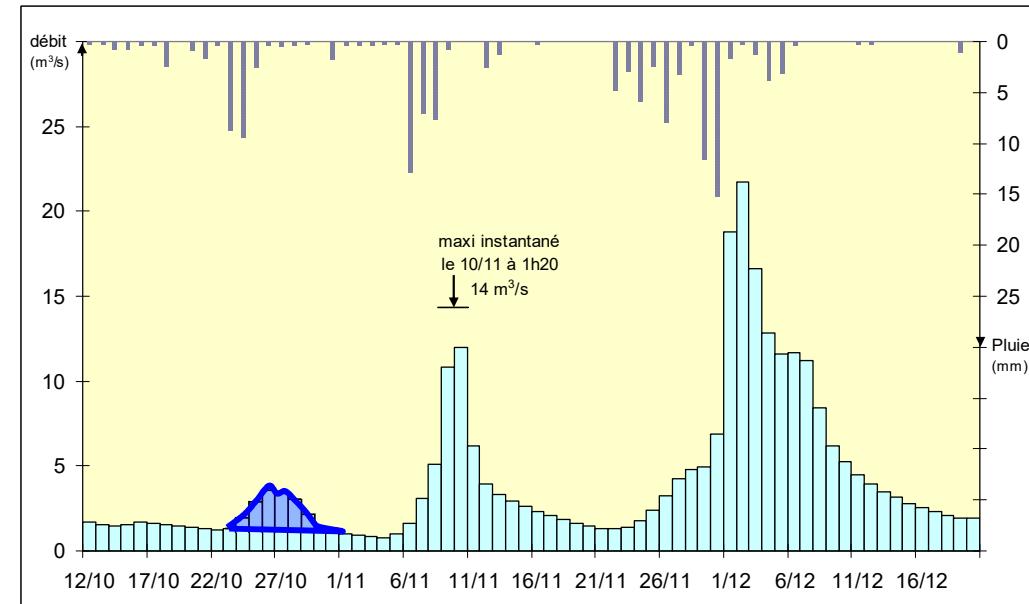
Les crues et la séparation des écoulements



jour	débit (m ³ /s)	pluie moy. (mm)	Chambley	Bras/M	Conflans
12/10	1,69	0	0,1	0	0
13/10	1,56	0	0,1	0	0
14/10	1,5	0,9	0,7	1,8	0,1
15/10	1,53	0,7	0,6	1,6	0
16/10	1,72	0,3	0,2	0,2	0,5
17/10	1,64	0,1	0,2	0,2	0
18/10	1,54	2,8	2,3	6,2	0
19/10	1,45	0	0	0	0
20/10	1,4	1,5	0,8	3,2	0,5
21/10	1,33	3,3	1,5	2,6	5,7
22/10	1,26	1,7	0,2	0	5
23/10	1,34	7	8,6	7	5,5
24/10	1,9	6,7	9,3	5,5	5,4
25/10	2,87	2,4	2,4	2,8	1,9
26/10	3,55	0,1	0,2	0	0
27/10	3,39	0,9	0,4	2,2	0,2
28/10	3,01	0,2	0,3	0	0,2
29/10	2,17	0	0,1	0	0
30/10	1,35	0	0	0	0
31/10	1,1	2,6	1,7	3,8	2,4
1/11	1	0,4	0,2	0	0,9
2/11	0,94	0,1	0,2	0	0,2
3/11	0,86	0,1	0,2	0	0,2
4/11	0,79	0,1	0,1	0	0,2
5/11	1	0	0,1	0	0
6/11	1,66	11,9	12,7	11	12
7/11	3,07	12,6	7	16	15
8/11	5,11	6,8	7,5	9	4
9/11	10,8	0,2	0,6	0	0
10/11	12	0	0	0	0
11/11	6,17	0	0	0	0
12/11	3,97	3,3	2,4	4,5	3
13/11	3,31	0,8	1,1	1	0,4
14/11	2,93	0,2	0	0,4	
15/11	2,6	0,1	0	0,2	
16/11	2,32	0	0,1	0	0
17/11	2,06	0	0	0	0
18/11	1,83	0	0	0	0
19/11	1,61	0	0	0	0
20/11	1,44	0,1	0	0,2	
21/11	1,3	0,2	0	0,4	
22/11	1,29	6,7	4,7	11	4,4
23/11	1,4	3,5	2,8	3,8	4

l'YRON à Jarny crue de novembre 2001

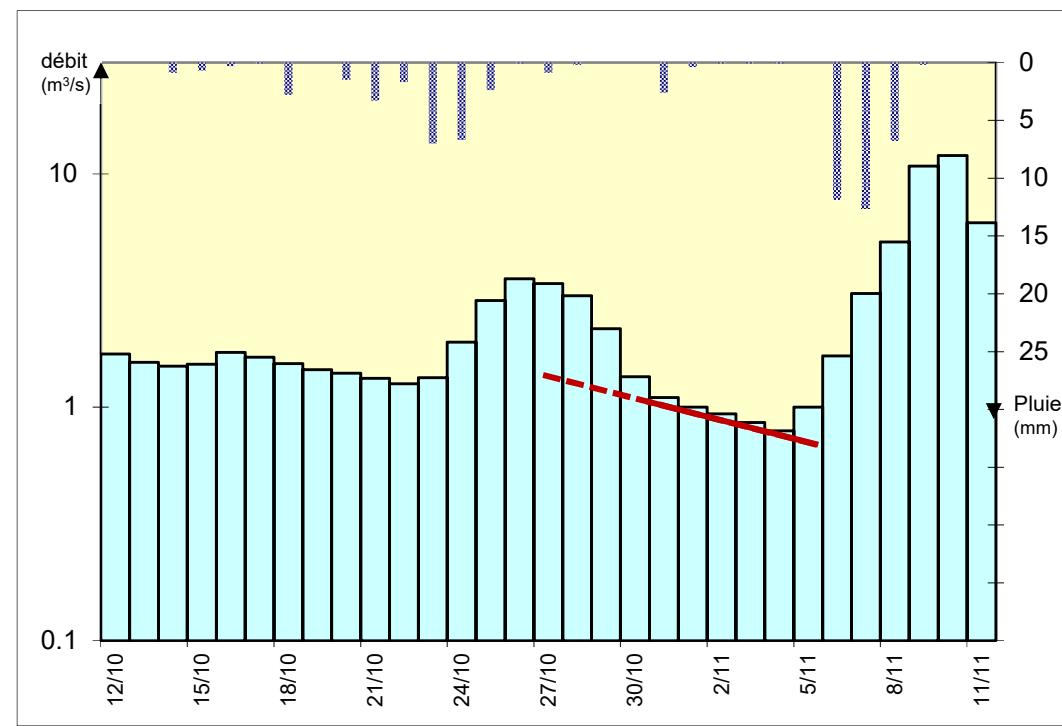
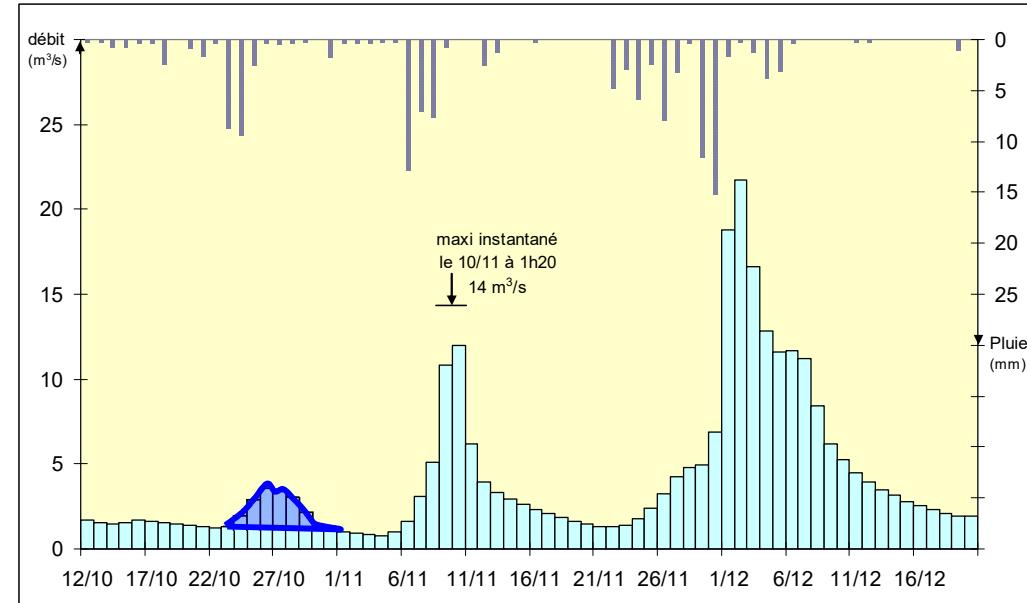
**calcul de l'écoulement
rapide de crue :**



jour	débit (m ³ /s)	pluie moy. (mm)	Chambley	Bras/M	Conflans
12/10	1,69	0	0,1	0	0
13/10	1,56	0	0,1	0	0
14/10	1,5	0,9	0,7	1,8	0,1
15/10	1,53	0,7	0,6	1,6	0
16/10	1,72	0,3	0,2	0,2	0,5
17/10	1,64	0,1	0,2	0,2	0
18/10	1,54	2,8	2,3	6,2	0
19/10	1,45	0	0	0	0
20/10	1,4	1,5	0,8	3,2	0,5
21/10	1,33	3,3	1,5	2,6	5,7
22/10	1,26	1,7	0,2	0	5
23/10	1,34	7	8,6	7	5,5
24/10	1,9	6,7	9,3	5,5	5,4
25/10	2,87	2,4	2,4	2,8	1,9
26/10	3,55	0,1	0,2	0	0
27/10	3,39	0,9	0,4	2,2	0,2
28/10	3,01	0,2	0,3	0	0,2
29/10	2,17	0	0,1	0	0
30/10	1,35	0	0	0	0
31/10	1,1	2,6	1,7	3,8	2,4
1/11	1	0,4	0,2	0	0,9
2/11	0,94	0,1	0,2	0	0,2
3/11	0,86	0,1	0,2	0	0,2
4/11	0,79	0,1	0,1	0	0,2
5/11	1	0	0,1	0	0
6/11	1,66	11,9	12,7	11	12
7/11	3,07	12,6	7	16	15
8/11	5,11	6,8	7,5	9	4
9/11	10,8	0,2	0,6	0	0
10/11	12	0	0	0	0
11/11	6,17	0	0	0	0
12/11	3,97	3,3	2,4	4,5	3
13/11	3,31	0,8	1,1	1	0,4
14/11	2,93	0,2	0	0,4	
15/11	2,6	0,1	0	0,2	
16/11	2,32	0	0,1	0	0
17/11	2,06	0	0	0	0
18/11	1,83	0	0	0	0
19/11	1,61	0	0	0	0
20/11	1,44	0,1	0	0,2	
21/11	1,3	0,2	0	0,4	
22/11	1,29	6,7	4,7	11	4,4
23/11	1,4	3,5	2,8	3,8	4

I'YRON à Jarny crue d'oct. nov 2001

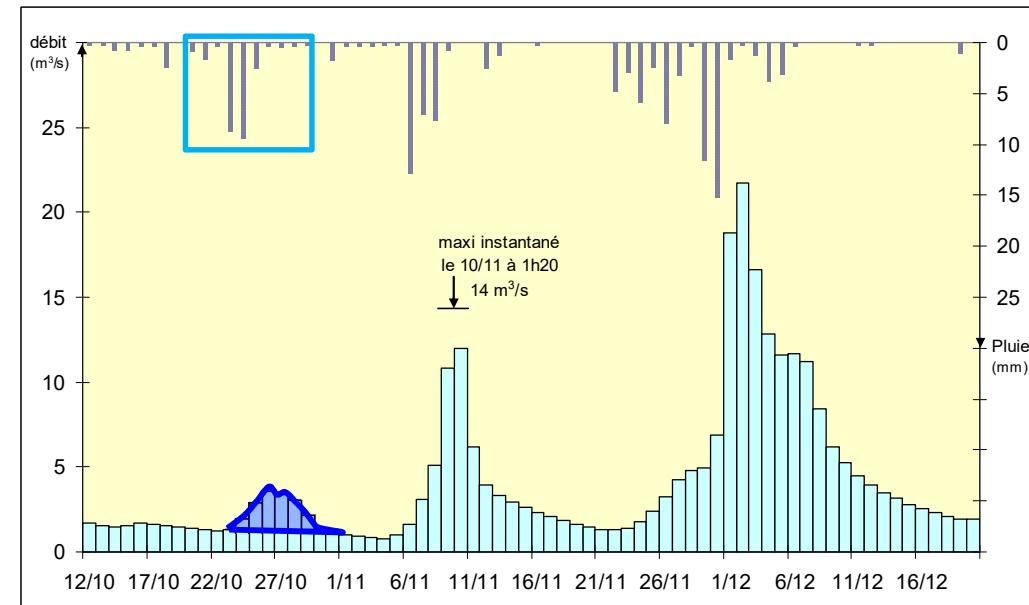
1^{er} épisode :
Détermination du début
et de la fin de la crue :



jour	débit (m ³ /s)	pluie moy. (mm)	Chambley	Bras/M	Conflans
12/10	1,69	0	0,1	0	0
13/10	1,56	0	0,1	0	0
14/10	1,5	0,9	0,7	1,8	0,1
15/10	1,53	0,7	0,6	1,6	0
16/10	1,72	0,3	0,2	0,2	0,5
17/10	1,64	0,1	0,2	0,2	0
18/10	1,54	2,8	2,3	6,2	0
19/10	1,45	0		0	0
20/10	1,4	1,5	0,8	3,2	0,5
21/10	1,33	3,3	1,5	2,6	5,7
22/10	1,26	1,7	0,2	0	5
23/10	1,34	7	8,6	7	5,5
24/10	1,9	6,7	9,3	5,5	5,4
25/10	2,87	2,4	2,4	2,8	1,9
26/10	3,55	0,1	0,2	0	0
27/10	3,39	0,9	0,4	2,2	0,2
28/10	3,01	0,2	0,3	0	0,2
29/10	2,17	0	0,1	0	0
30/10	1,35	0		0	0
31/10	1,1	2,6	1,7	3,8	2,4
1/11	1	0,4	0,2	0	0,9
2/11	0,94	0,1	0,2	0	0,2
3/11	0,86	0,1	0,2	0	0,2
4/11	0,79	0,1	0,1	0	0,2
5/11	1	0	0,1	0	0
6/11	1,66	11,9	12,7	11	12
7/11	3,07	12,6	7	16	15
8/11	5,11	6,8	7,5	9	4
9/11	10,8	0,2	0,6	0	0
10/11	12	0		0	0
11/11	6,17	0		0	0
12/11	3,97	3,3	2,4	4,5	3
13/11	3,31	0,8	1,1	1	0,4
14/11	2,93	0,2		0	0,4
15/11	2,6	0,1		0	0,2
16/11	2,32	0	0,1	0	0
17/11	2,06	0		0	0
18/11	1,83	0		0	0
19/11	1,61	0		0	0
20/11	1,44	0,1		0	0,2
21/11	1,3	0,2		0	0,4
22/11	1,29	6,7	4,7	11	4,4
23/11	1,4	3,5	2,8	3,8	4

I'YRON à Jarny crue d'oct. nov 2001

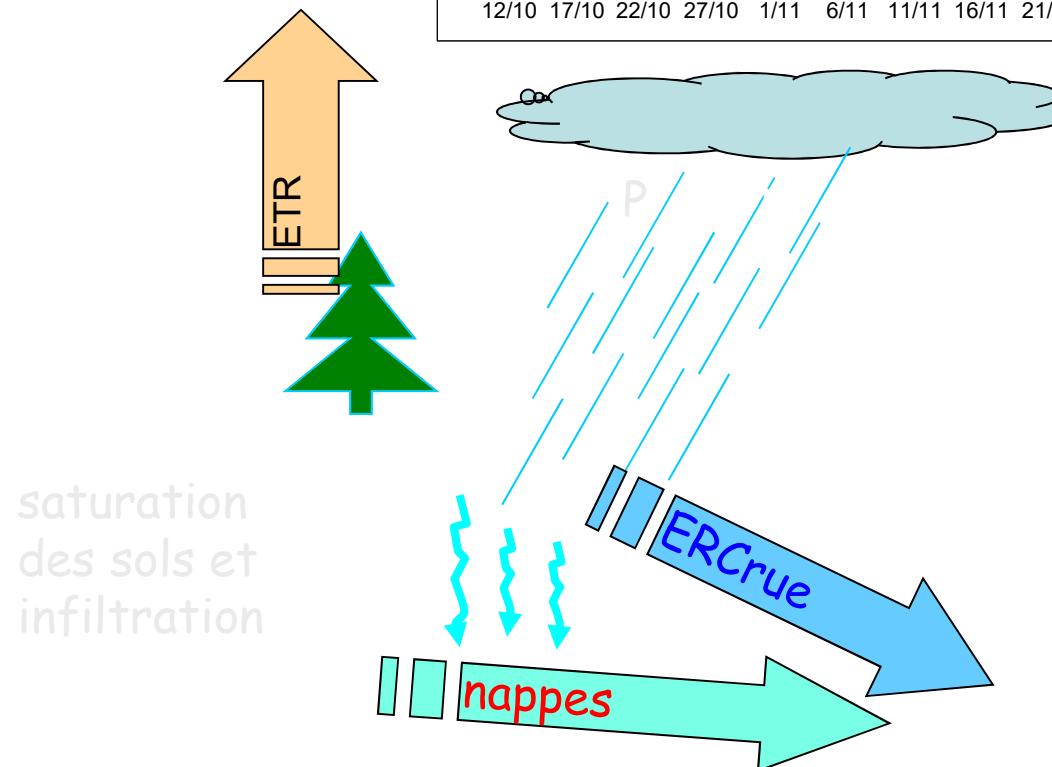
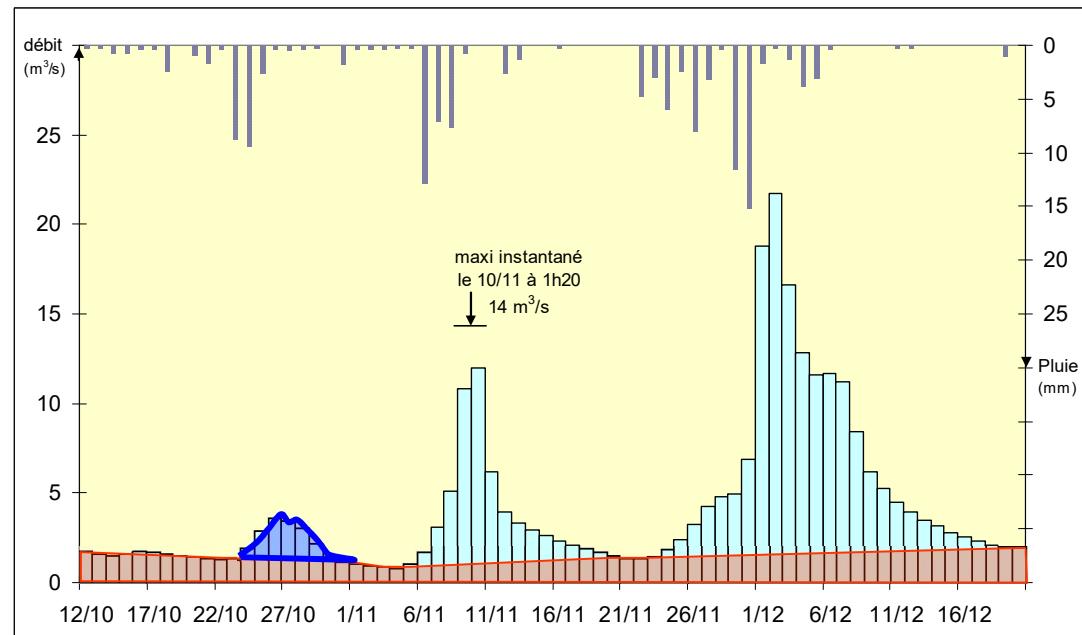
calcul de l'écoulement
rapide de crue :



1ère crue					
durée de la crue	8	jours du	23/10	au	30/10 inclus
éc de base avant la crue	1.26	m ³ /s le :	22/10	retour à l'éc de base	1.1 m ³ /s le : 31/10
		volume		débit moyen :	lame d'eau éq.
pluie moyenne BV		9 115 400 m ³			23.8 mm
éc de base :		820 000 m ³		1.18 m ³ /s	2.1 mm
éc total :		1 690 000 m ³		2.45 m ³ /s	4.4 mm
ERC :		870 000 m ³		1.26 m ³ /s	2.3 mm
coef. d'éc de crue (ERC/P):		10%			

jour	débit (m ³ /s)	pluie moy. (mm)	Chambley	Bras/M	Conflans
12/10	1,69	0	0,1	0	0
13/10	1,56	0	0,1	0	0
14/10	1,5	0,9	0,7	1,8	0,1
15/10	1,53	0,7	0,6	1,6	0
16/10	1,72	0,3	0,2	0,2	0,5
17/10	1,64	0,1	0,2	0,2	0
18/10	1,54	2,8	2,3	6,2	0
19/10	1,45	0	0	0	0
20/10	1,4	1,5	0,8	3,2	0,5
21/10	1,33	3,3	1,5	2,6	5,7
22/10	1,26	1,7	0,2	0	5
23/10	1,34	7	8,6	7	5,5
24/10	1,9	6,7	9,3	5,5	5,4
25/10	2,87	2,4	2,4	2,8	1,9
26/10	3,55	0,1	0,2	0	0
27/10	3,39	0,9	0,4	2,2	0,2
28/10	3,01	0,2	0,3	0	0,2
29/10	2,17	0	0,1	0	0
30/10	1,35	0	0	0	0
31/10	1,1	2,6	1,7	3,8	2,4
1/11	1	0,4	0,2	0	0,9
2/11	0,94	0,1	0,2	0	0,2
3/11	0,86	0,1	0,2	0	0,2
4/11	0,79	0,1	0,1	0	0,2
5/11	1	0	0,1	0	0
6/11	1,66	11,9	12,7	11	12
7/11	3,07	12,6	7	16	15
8/11	5,11	6,8	7,5	9	4
9/11	10,8	0,2	0,6	0	0
10/11	12	0	0	0	0
11/11	6,17	0	0	0	0
12/11	3,97	3,3	2,4	4,5	3
13/11	3,31	0,8	1,1	1	0,4
14/11	2,93	0,2	0	0	0,4
15/11	2,6	0,1	0	0,2	
16/11	2,32	0	0,1	0	0
17/11	2,06	0	0	0	0
18/11	1,83	0	0	0	0
19/11	1,61	0	0	0	0
20/11	1,44	0,1	0	0,2	
21/11	1,3	0,2	0	0,4	
22/11	1,29	6,7	4,7	11	4,4
23/11	1,4	3,5	2,8	3,8	4

L'ETR est estimé à partir des valeurs moyennes d'ETP pour le mois de novembre ramenées à la durée de la crue



Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm)	6	12	33	57	90	101	113	100	62	34	14	8

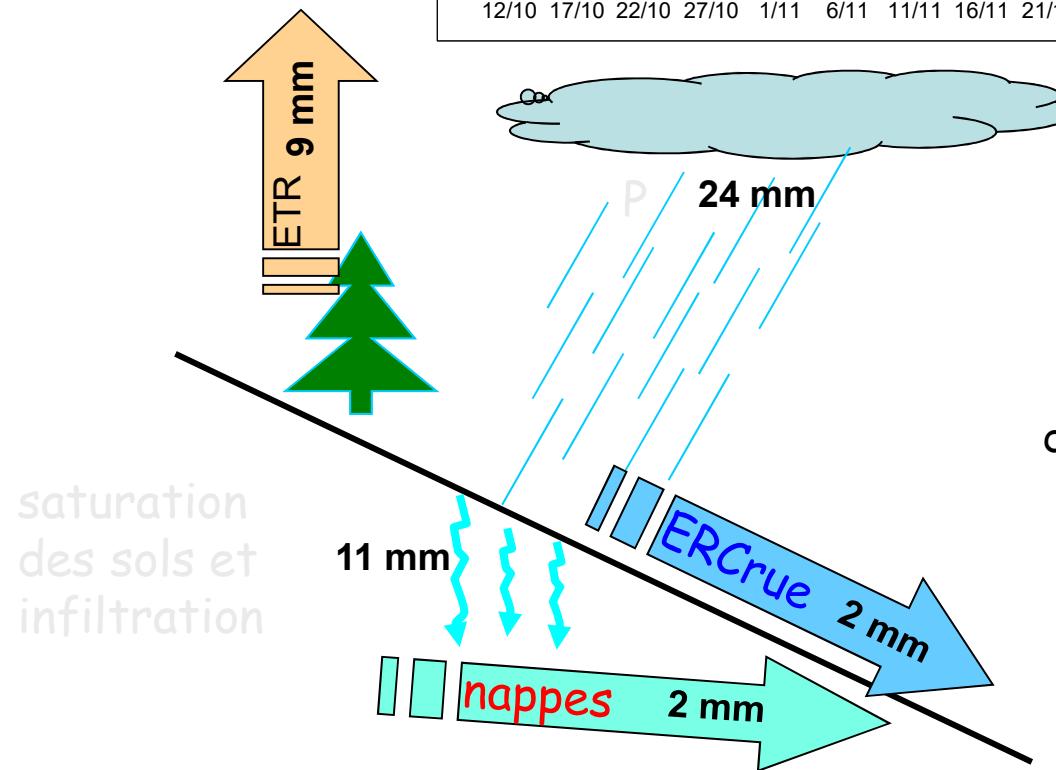
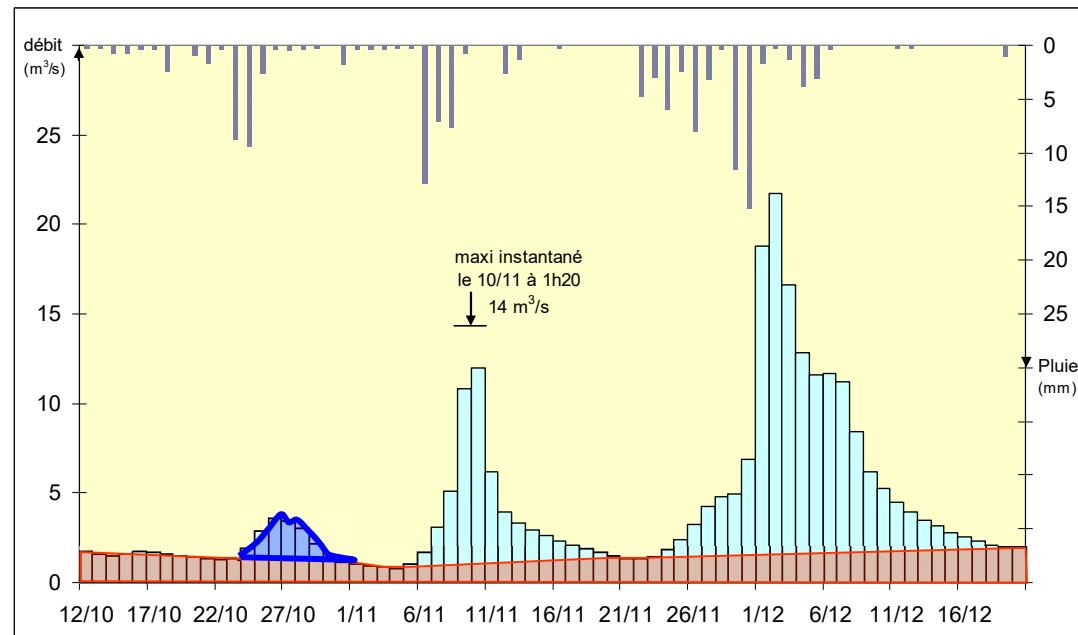
En octobre : 34 mm d'ETP

Durée de la crue : 8 jours

Environ 9 mm durant la crue

jour	débit (m ³ /s)	pluie moy. (mm)	Chambley	Bras/M	Conflans
12/10	1,69	0	0,1	0	0
13/10	1,56	0	0,1	0	0
14/10	1,5	0,9	0,7	1,8	0,1
15/10	1,53	0,7	0,6	1,6	0
16/10	1,72	0,3	0,2	0,2	0,5
17/10	1,64	0,1	0,2	0,2	0
18/10	1,54	2,8	2,3	6,2	0
19/10	1,45	0	0	0	0
20/10	1,4	1,5	0,8	3,2	0,5
21/10	1,33	3,3	1,5	2,6	5,7
22/10	1,26	1,7	0,2	0	5
23/10	1,34	7	8,6	7	5,5
24/10	1,9	6,7	9,3	5,5	5,4
25/10	2,87	2,4	2,4	2,8	1,9
26/10	3,55	0,1	0,2	0	0
27/10	3,39	0,9	0,4	2,2	0,2
28/10	3,01	0,2	0,3	0	0,2
29/10	2,17	0	0,1	0	0
30/10	1,35	0	0	0	0
31/10	1,1	2,6	1,7	3,8	2,4
1/11	1	0,4	0,2	0	0,9
2/11	0,94	0,1	0,2	0	0,2
3/11	0,86	0,1	0,2	0	0,2
4/11	0,79	0,1	0,1	0	0,2
5/11	1	0	0,1	0	0
6/11	1,66	11,9	12,7	11	12
7/11	3,07	12,6	7	16	15
8/11	5,11	6,8	7,5	9	4
9/11	10,8	0,2	0,6	0	0
10/11	12	0	0	0	0
11/11	6,17	0	0	0	0
12/11	3,97	3,3	2,4	4,5	3
13/11	3,31	0,8	1,1	1	0,4
14/11	2,93	0,2	0	0	0,4
15/11	2,6	0,1	0	0,2	
16/11	2,32	0	0,1	0	0
17/11	2,06	0	0	0	0
18/11	1,83	0	0	0	0
19/11	1,61	0	0	0	0
20/11	1,44	0,1	0	0,2	
21/11	1,3	0,2	0	0,4	
22/11	1,29	6,7	4,7	11	4,4
23/11	1,4	3,5	2,8	3,8	4

L'ETR est estimé à partir des valeurs moyennes d'ETP pour le mois de novembre ramenées à la durée de la crue



coefficient d'écoulement de crue :
 $(2/24) = 10\%$

3. L'analyse du tarissement

Définition de la phase de tarissement :

période pendant laquelle le débit d'une rivière est produit par le seul écoulement souterrain

constat : dans une phase de tarissement, le débit diminue et il diminue de moins en moins...
la décroissance des débits caractérise donc la vidange des nappes ;

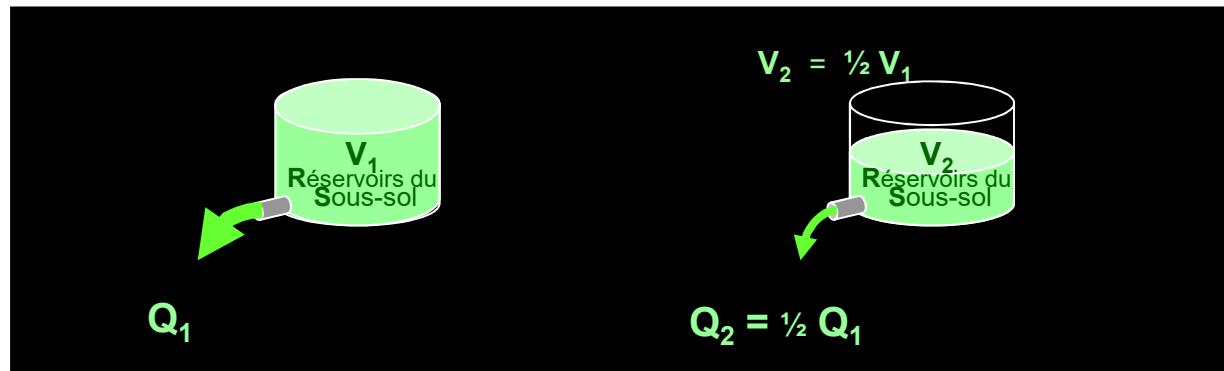
hypothèse 1 : le débit est proportionnel à la pression donc à la hauteur d'eau dans la nappe

$$Q = f(h) \quad \text{ou} \quad Q = f(V/A)$$

avec, pour la nappe :

V = volume

A = surface



La loi de la vidange d'une nappe reposant sur ces hypothèses peut s'écrire :

$$Q = C_V \times V$$

La loi de la vidange des nappes :

$$Q = Cv \times V$$

Dans une phase de tarissement , la relation entre **deux débits successifs**, et donc entre **deux états successifs de la nappe**, se résume à un simple coefficient d'amenuisement : le **coefficient de tarissement** : **k** lié au **coefficient de vidange des nappes** : **$k = 1 - Cv$**

[**k** aussi peut s'exprimer en % : **$k = 0,99$** journalier signifie que le débit du jour **$Qi = 99\%$** de **$Qi-1$** le débit de la veille

$$\text{la loi du tarissement : } Q_t = Q_0 k^t$$

Volume restant dans les nappes à **t** :

$$\text{volume restant à } t : \quad v_t = \frac{Q_t}{Cv}$$

En prévision, il est intéressant d'estimer le temps (**$t_{1/2}^{vid}$**) que prendra la vidange de la moitié de la nappe :

$$t_{1/2}^{vid} = \ln(1/2) / \ln(k)$$

Exemple de l'Andon à Cléry-grand en 1976

Application

Tarissemement du 15/3 au 23/8

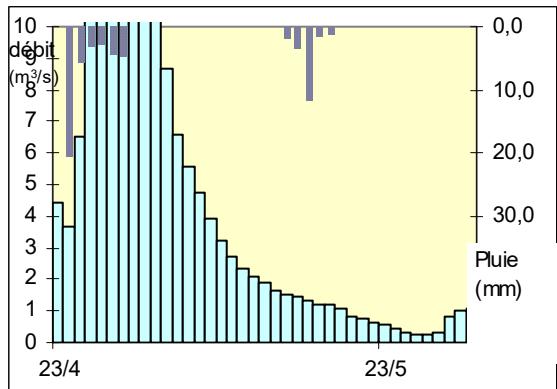
débit de début	ajusté de fin
Q'_d	Q'_f
0,505	0,038
$\ln(Q'_d)$	$\ln(Q'_f)$
-0,6832	-3,2702

Tarissemement du 15/3 au 17/7

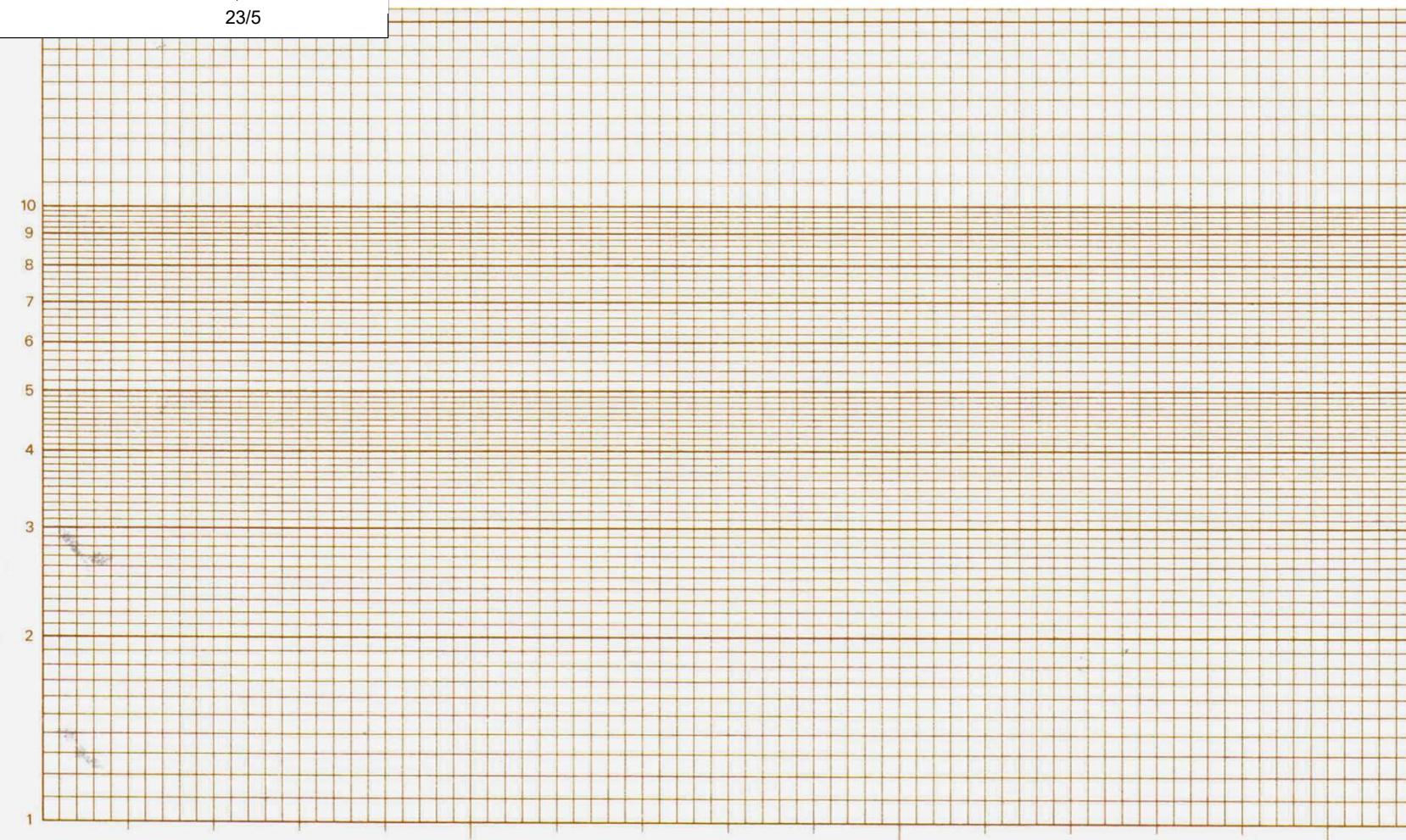
débit de début ajusté	débit de fin ajusté Q'_f
Q'_d	Q'_f
0,505	0,067
$\ln(Q'_d)$	$\ln(Q'_f)$
-0,6832	-2,7031

161 jours
0,9841
0,0159
0,0161
38%
43 jours
2,74 Mm ³
0,26 Mm ³

122 jours
0,9836
0,0164
0,0166
39%
42 jours
2,66 Mm ³
0,35 Mm ³



Pour le dossier : identifier une phase de tarissement de l'Yron à Jarny sur la banque hydro et estimer le coefficient de vidange des nappes.



Le bilan hydrique et la détermination de son surplus , c'est-à-dire les « précipitations efficaces » (infiltration et écoulement)

En l'absence d'informations particulières, la valeur de la RU moyenne du BV peut être estimée à 100 mm . De même, les coefficients de correction des données sont initialement égaux à 1 ; en prenant ici, après essai, 98% de la pluie moyenne Thiessen on retombe sur la pluie moyenne des isohyètes

RU	100	mm
coef vidange du réservoir nappes	0,25	
coef corr précipitations	0,98	
coef corr ETP	1	
coef corr débit	1	

Bilan hydrique :

si $P_u < ETP$: épuisement de la réserve

- DP > 0
- DPC = DPCmois précédent + DP
- R = $RU/e^{(DPC/RU)}$
- dR = R-Rmois précédent
- ETR = $P_u + (-dR)$
- Besoins = ETP-ETR

si $P_u > ETP$: reconstitution de

- DP < 0
- R = $\min[RU, R_{mois précédent}]$
- dR = R-Rmois précédent
- DPC = $(\ln RU - \ln R) \cdot RU$
- ETR = ETP
- Surplus = $(-DP) - dR$

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
précipitations	83	70	74	61	61	70	70	59	71	89	75	98	881
coef d'écoulement de crue	0,55	0,45	0,35	0,30	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,15	0,30	0,55	
P pour le bilan	37	38	48	43	55	67	67	57	68	76	52	44	652
ETP	6	12	33	57	90	101	113	100	62	34	14	8	630
Déficit Pluviométrique	-31	-26	-15	14	35	34	46	43	-6	-42	-38	-36	
DPCumulé	0	0	0	14	49	83	129	172	143	42	0	0	
R (état de la R)	100	100	100	87	61	44	28	18	24	66	100	100	
DR (variation de la réserve)	0	0	0	-13	-26	-17	-16	-10	6	42	34	0	
ETR	6	12	33	56	81	84	83	67	62	34	14	8	540
BESOINS (ETP-ETR)	0	0	0	1	9	17	30	33	0	0	0	0	90
SURPLUS	31	26	15	0	0	0	0	0	0	0	4	36	112
Qcrue	46	32	26	18	6	3	3	2	3	13	23	54	229

minimum de la réserve :

18 mm 18%

Exemple janvier

$$Qcrue = P \times \text{Coef éc crue}$$

$$= 83 \times 0,55 = 46$$

$$P \text{ pour le bilan} = P - Qcrue$$

$$= 83 - 46 = 37$$

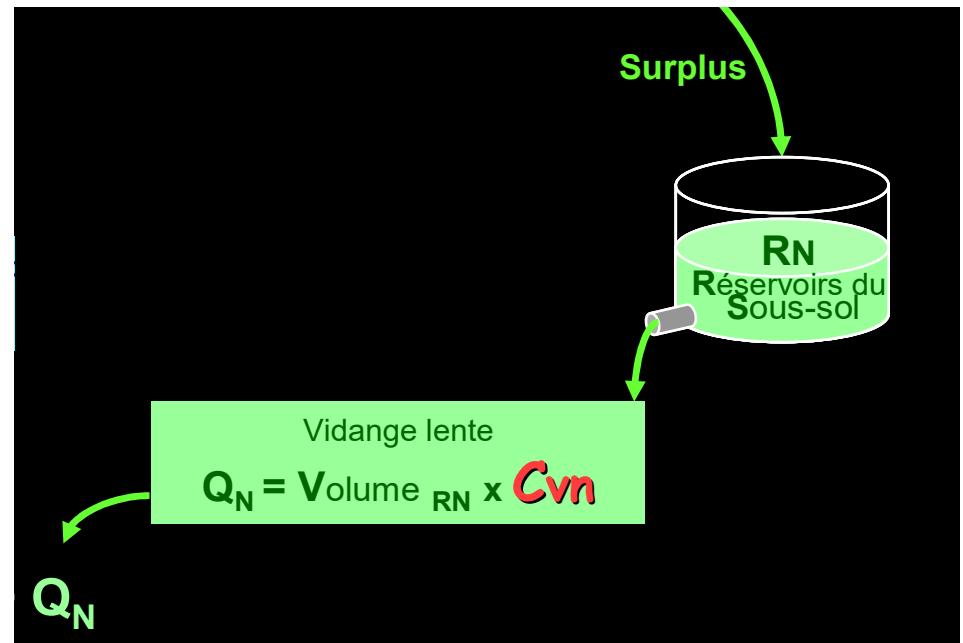
Le réservoir « nappes »

Il représente en fait une fonction de transfert : le **surplus**, qui est l'entrée du réservoir, va être étalé dans le temps.

C'est le **Cvn** , (coefficients de vidange des nappes) qui va régler l'écoulement du 2^{ème} réservoir.

Quelle valeur pour Cvn ?

Elle doit être en conformité avec les valeurs issues de l'analyse du tarissement pour que le modèle reste de type conceptuel.



Ensuite on peut s'appuyer sur une autre observation, celle du *Cvn* expérimental calculé sur les débits bruts d'avril, 1^{er} mois de déficit pluviométrique, et d'août dernier mois de tarissement, 4 mois plus tard (parfois septembre)

$$\begin{aligned} \text{Coef de vidange avril-août (4mois)} &= 1 - (Q_{\text{août}}/Q_{\text{avril}})^{1/4} \\ &= 1 - (0,82/4,52)^{1/4} \\ &=? \end{aligned}$$

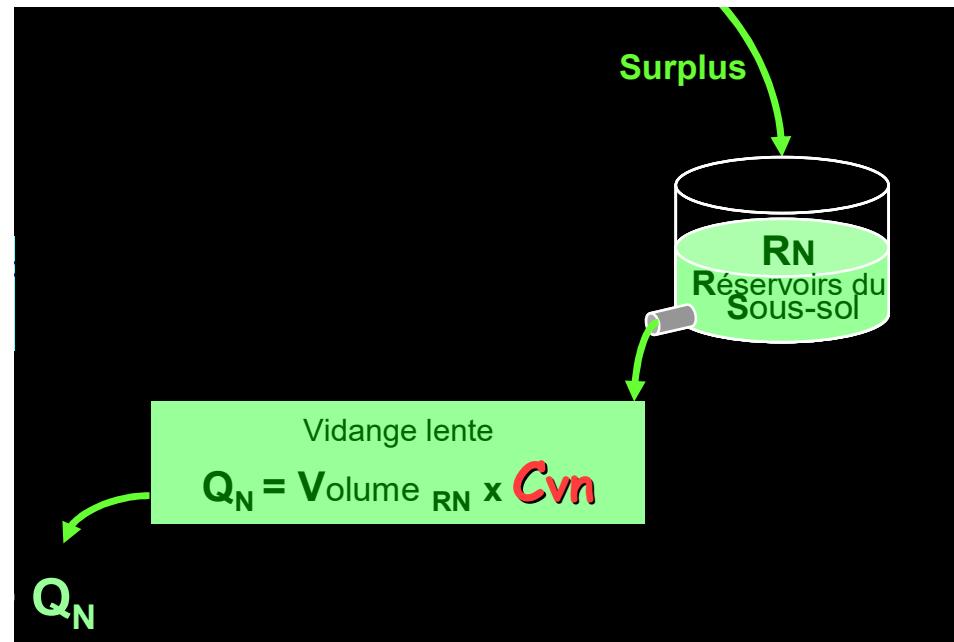
Le réservoir « nappes »

Pour représenter une année moyenne, **le régime**, il faut établir un **régime permanent** (les entrées sont égales aux sorties).

Or, on ne connaît pas l'état initial du réservoir en janvier ; il faut procéder par **itérations** (le résultat d'un premier passage est réintroduit comme état initial d'un second et ainsi de suite jusqu'à stabilisation).

Il vaut mieux commencer par le mois du premier surplus : ex. ici novembre

→ hypothèse : volume nappes fin Octobre = 0



essai 1 : $Cvn = 0,25$

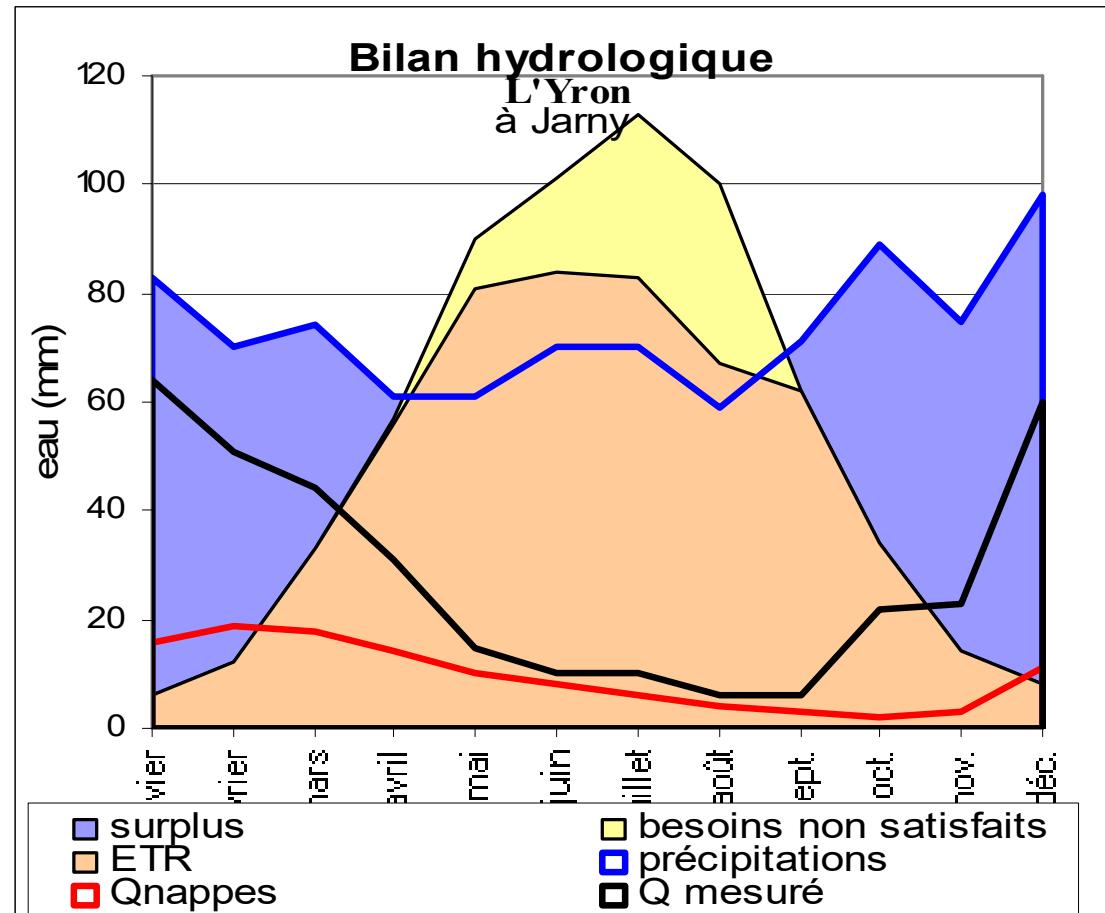
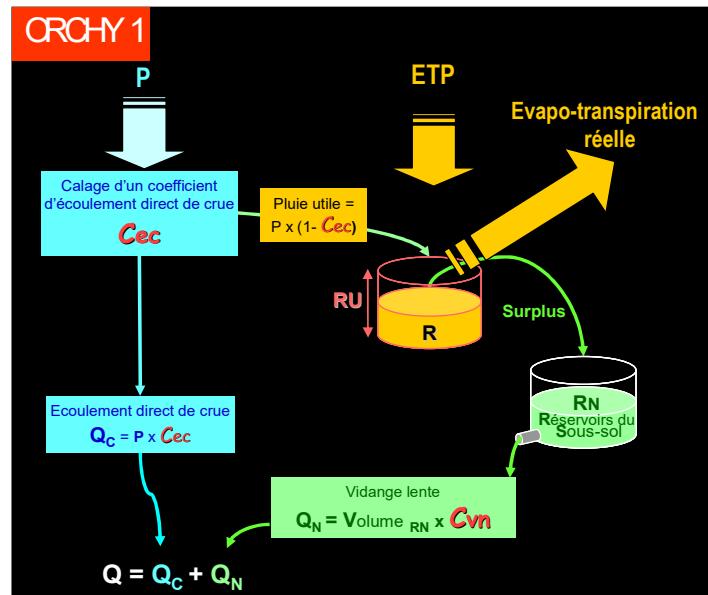
	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
SURPLUS	31	26	15	0	0	0	0	0	0	0	4	36	112
volume nappes											4	39	/
volume fin										0	3	29	/
Qnappes + VOL NAPPEx 0,25										0	1	10	
volume nappes	60	71	68	51	38	28	21	16	12	9	11	44	/
volume fin	45	53	51	38	28	21	16	12	9	7	8	33	/
Qnappes	15	18	17	13	10	7	5	4	3	2	3	11	108
volume nappes	64	74	70	52	39	29	22	16	12	9	11	44	/
volume fin	48	55	52	39	29	22	16	12	9	7	8	33	/
Qnappes	16	19	18	13	10	7	6	4	3	2	3	11	112

Rés.rég.
mm hm³
Ind.hydrogéol.

Les entrées (= SURPLUS) sont égales aux sorties (= Qnappes) dès le 3^{ème} passage :
le régime permanent est établi

Le bilan hydrologique

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année		
Qnappes	16	19	18	13	10	7	6	4	3	2	3	11	112		
en %	26%	37%	41%	42%	63%	70%	67%	67%	50%	41%	4%	10%	33%	33%	
Qcrue	46	32	26	18	6	3	3	2	3	13	23	54	229	Ind.hydro	0,49
en %	74%	63%	59%	58%	38%	30%	33%	33%	50%	59%	96%	90%	67%	67%	
autres transferts ou réserves									0	7	-2	-5	0		
Q total calculé	62	51	44	31	16	10	9	6	6	22	24	60	341		
Q mesuré	64	51	44	31	15	10	10	6	6	22	23	60	342		



Le bilan hydrologique : validation

L'efficacité de la modélisation est appréciée par différents moyens, comparant en général le calculé et l'observé

Une des façons de minimiser les écarts est de reprendre la démarche des moindres carrés :

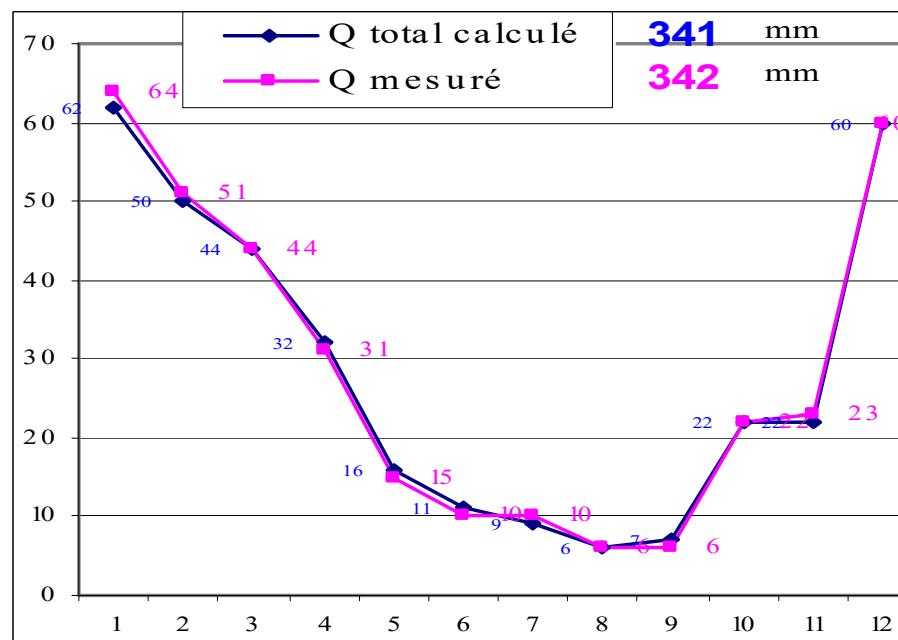
le Root Mean Squared Error (RMSE) , est une sorte d'écart-type ($\sqrt{\text{variance}}$) à la différence que la variance fait la somme des écarts² à la moyenne, alors que dans le RMSE fait la somme des écarts² observés-calculés :

- on calcule les écarts au carré : $(Q_{\text{calculé}} - Q_{\text{observé}})^2$
- on en fait la somme et on divise par le nombre d'observations (-les degrés de liberté)
- on en prend la racine

erreur (écart)	-2	-1	0	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	-1
erreur (écart) ²	4	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	9

rmse

0,87 mm



Remarques sur la représentation du bilan hydrologique

Dans ce type de modélisation globale (le BV est traité globalement), conceptuelle (on essaie de représenter vraiment les mécanismes des écoulements par des fonctions-productions et des fonctions de transfert), on peut en fait parvenir à des résultats identiques avec des jeux de valeurs de paramètres contradictoires :

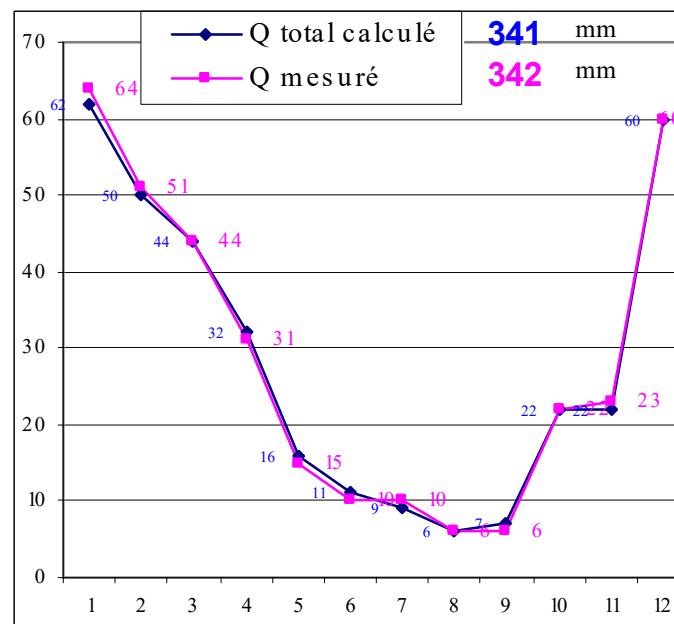
coef d'écoulement de crue	0,55	0,45	0,35	0,30	0,10	0,04	0,04	0,04	0,15	0,30	0,55
---------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

essai provateur avec coefficients d'écoulement de crue plus faibles et Cvn plus fort :

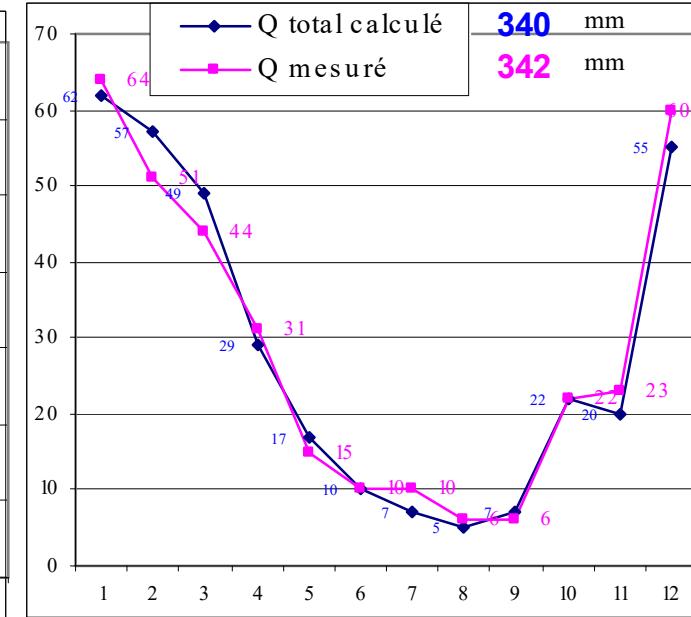
coef d'écoulement de crue	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03	0,05	0,15	0,20	0,30
---------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Ceci montre que les paramètres utilisés (Cec, Cvn, RU), même s'ils sont censés représenter les processus, n'ont pas de signification hydrologique directe

... d'où l'intérêt de s'appuyer le plus possible sur les observations , particulièrement l'analyse de l'hydrogramme et des phases hydrologiques



essai 1 P = 881 mm
cec forts - cvn 0,25



essai provoc P = 898mm
cec moyens <=30% , cvn 0,4