

Méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes

1. Rappel sur les méthodes de prédétermination

- Théorie des valeurs extrêmes
- Approches régionales
- Approche historique
- Approches naturalistes : hydrogéomorphologie, paléohydrologie
- Approches basées sur les pluies : Gradex, simulateur d'averses

2. Quelques pistes pour l'intercomparaison de méthodes

1.1 Théorie des valeurs extrêmes

Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)

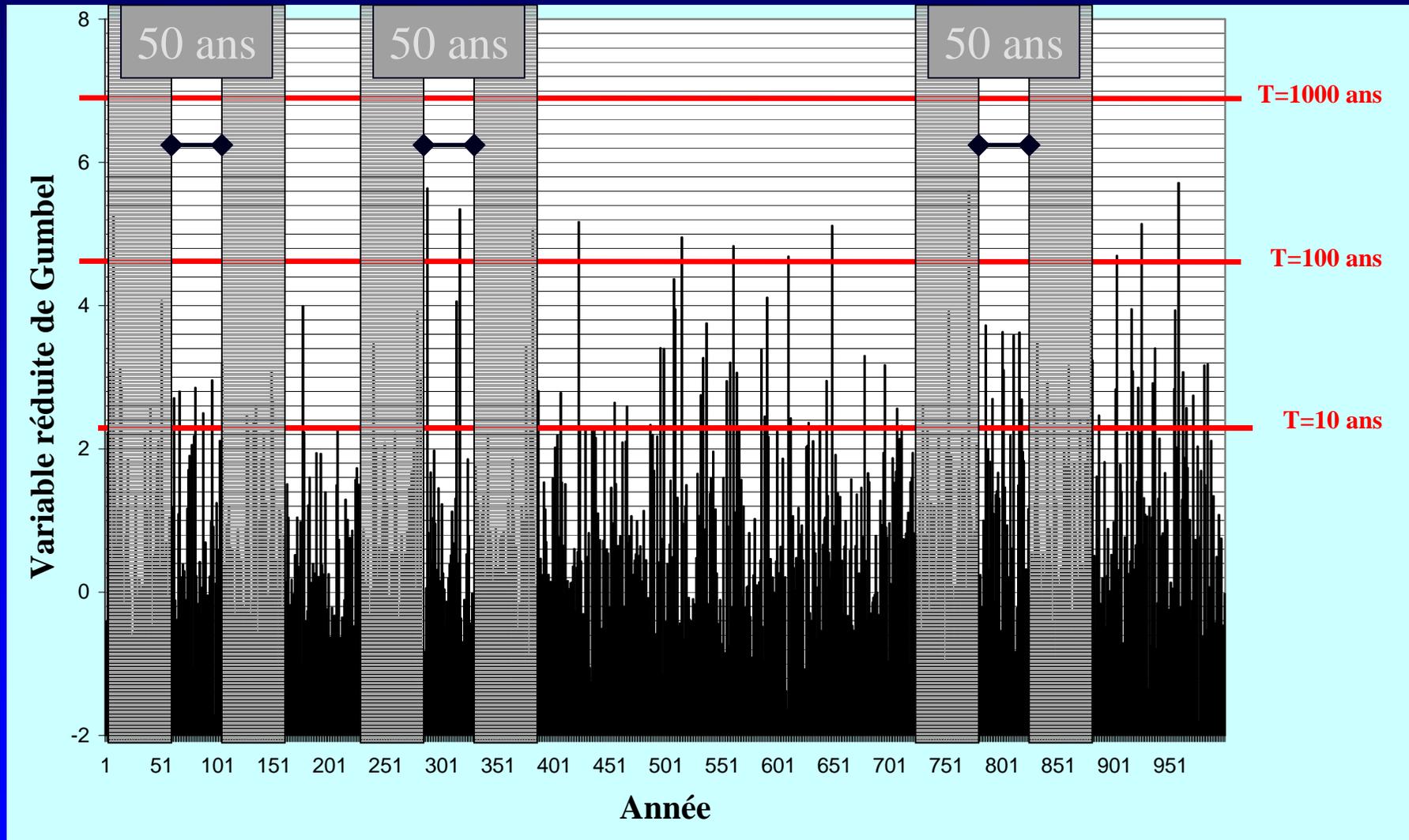
- Le maximum d'un nombre suffisamment grand de variables aléatoires (**iid**) converge en probabilité vers la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV)

$$\begin{aligned} \text{Prob}[\text{Max}(X_1, \dots, X_n) < x] &\rightarrow \exp\left\{-\left[1-k(x-x_0)/a\right]^{1/k}\right\} & k > 0 & \text{(Loi Weibull)} \\ & & k < 0 & \text{(loi Frechet)} \\ &\rightarrow \exp\left\{-\exp\left[(x-x_0)/a\right]\right\} & k = 0 & \text{(loi Gumbel)} \end{aligned}$$

⇒ Les hypothèses d'indépendance, de stationnarité, d'homogénéité et de caractère aléatoire ne sont que partiellement vérifiées en hydrologie

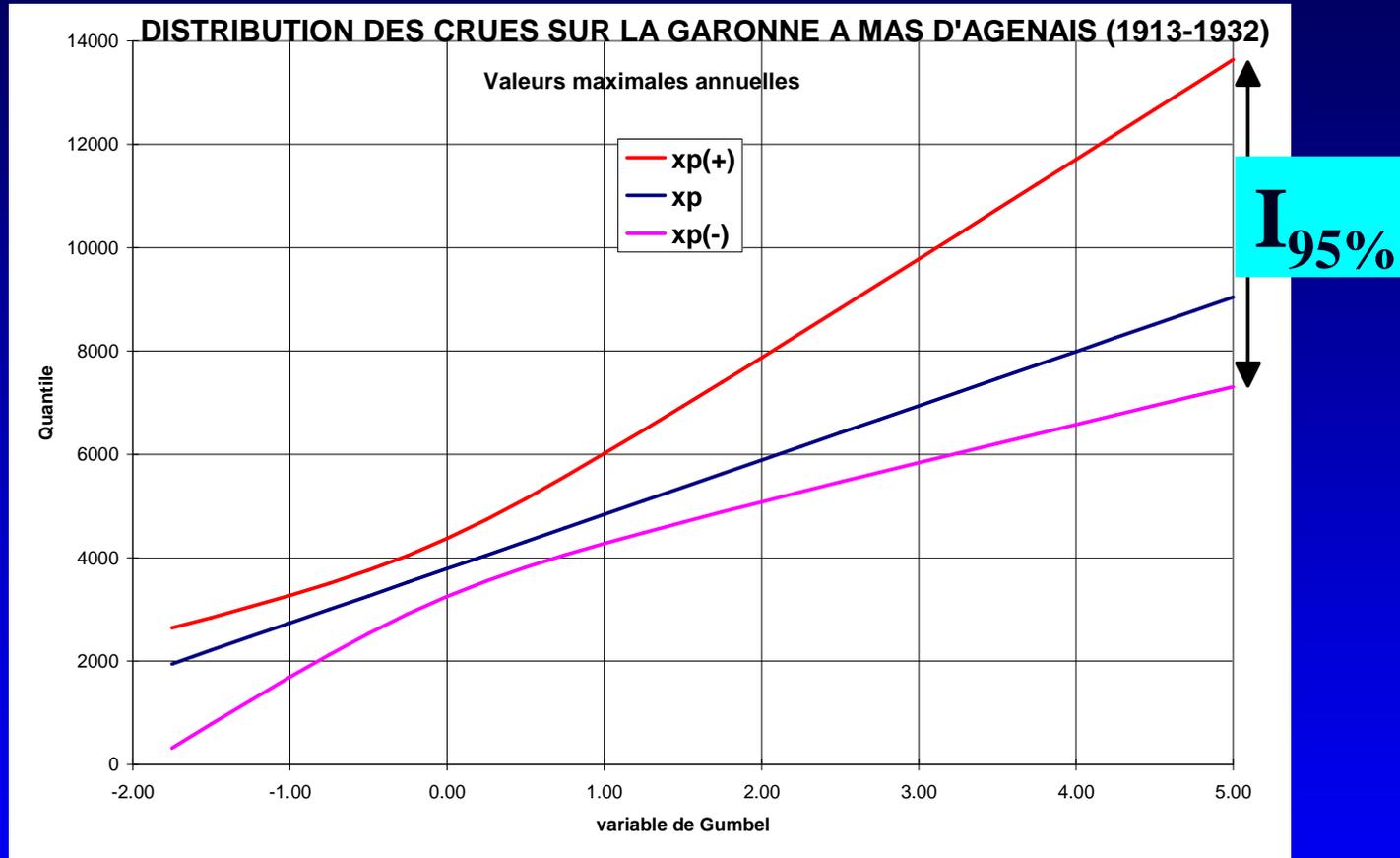
1.1 Théorie des valeurs extrêmes

Incertitudes d'estimation (1/3): échantillonnage



1.1 Théorie des valeurs extrêmes

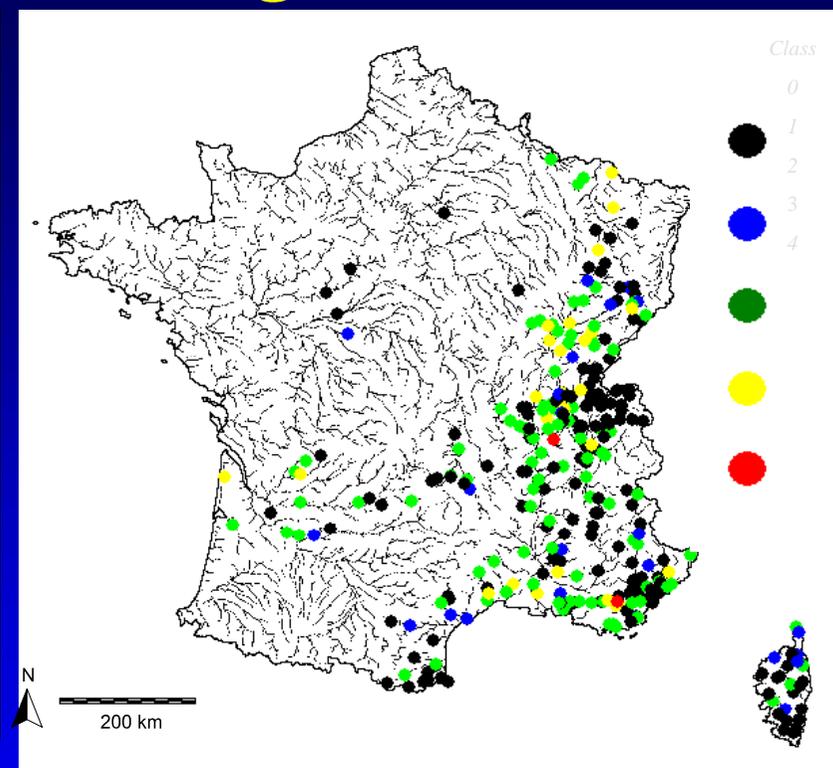
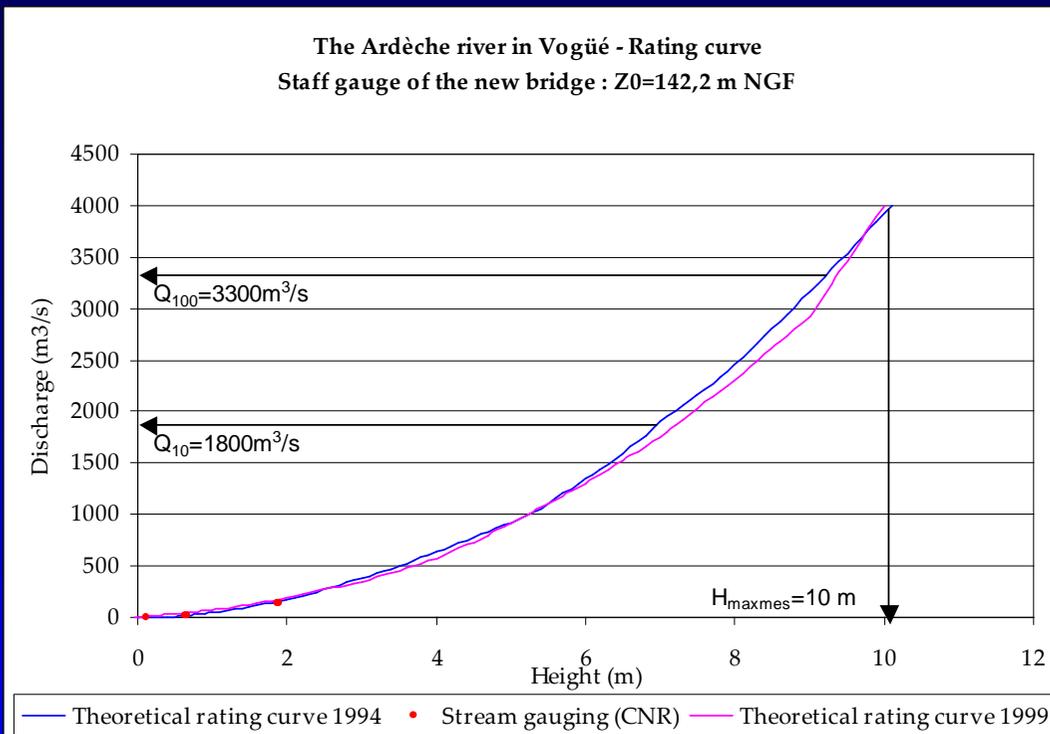
Incertitudes d'estimation (1/3): échantillonnage



L'intervalle de confiance s'élargit pour les valeurs extrêmes

1.1 Théorie des valeurs extrêmes

Incertitudes d'estimation (2/3): métrologie



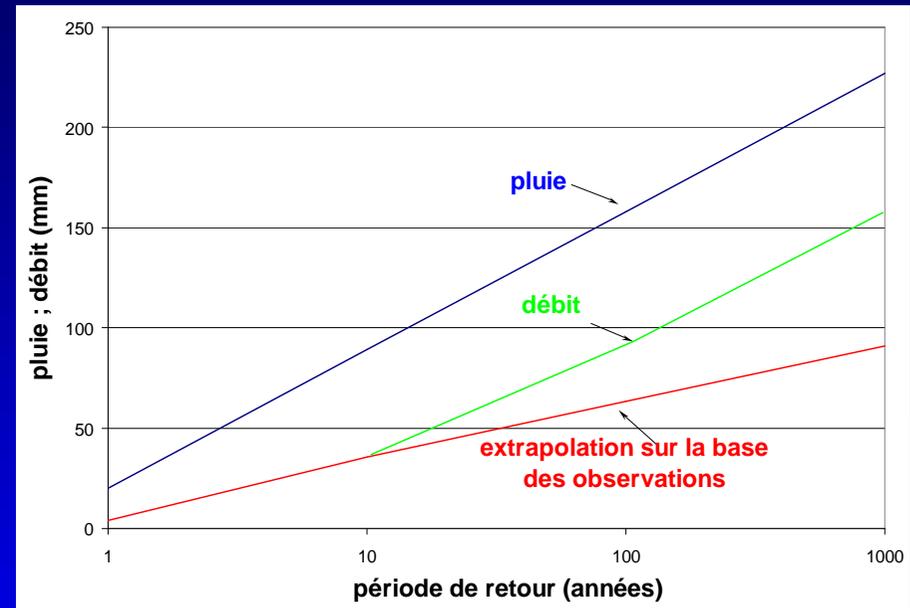
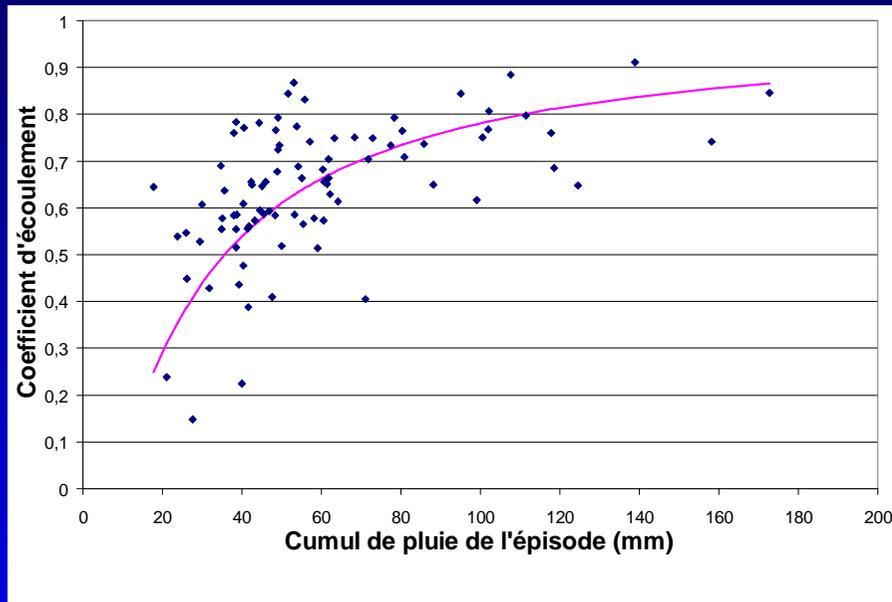
→ Extrapolation de la courbe de tarage

- 60% des stations non jaugées au-delà de la crue Q₂ (période de retour 2 ans)
- Moins de 10% des stations jaugées au-delà de la crue Q₁₀

Classe	●	●	●	●	●
Critère	$T < 1$ an	$1 < T < 2$	$2 < T < 10$	$10 < T < 100$	$T > 100$ ans
Effectif (%)	53	7	31	8	1

1.1 Théorie des valeurs extrêmes

Incertitudes d'estimation (3/3): choix du modèle probabiliste



Saturation progressive du bassin

→ Difficulté d'extrapoler sur les événements courants

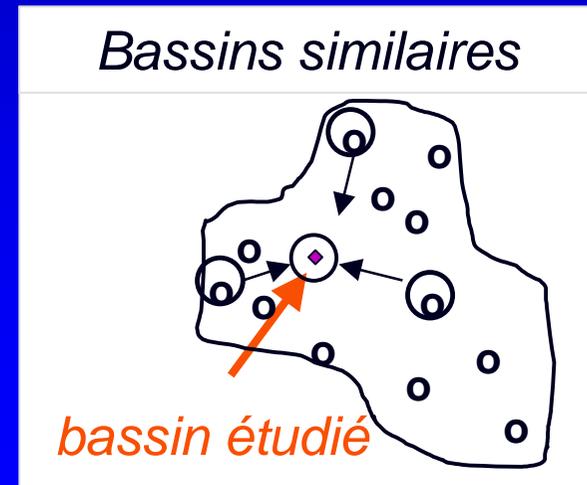
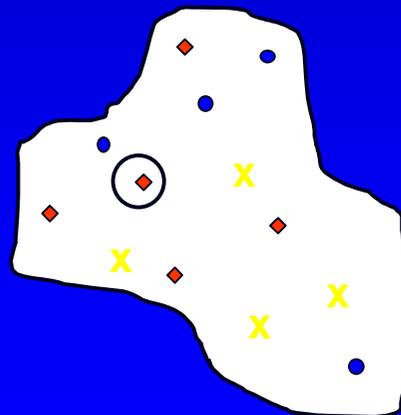
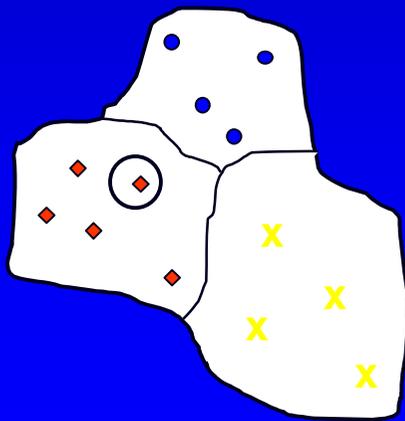
1.2 Approches régionales

Consolidation à l'échelle d'une région « homogène »

Méthode de l'indice de crue (Dalrymple, 1960)

- ✓ Définition d'une région hydrologique
- ✓ Loi régionale adimensionnelle par agglomération des données réduites des N bassins : $[Q_k(i)/\mu_k, i=1, NV_k]$
- ✓ Reconstitution en un site quelconque
 - * estimation de l'indice de crue μ_{local}
 - * dénormalisation de la loi régionale

Evolutions successives sur la notion de région homogène



Régions fixes contiguës puis non contiguës

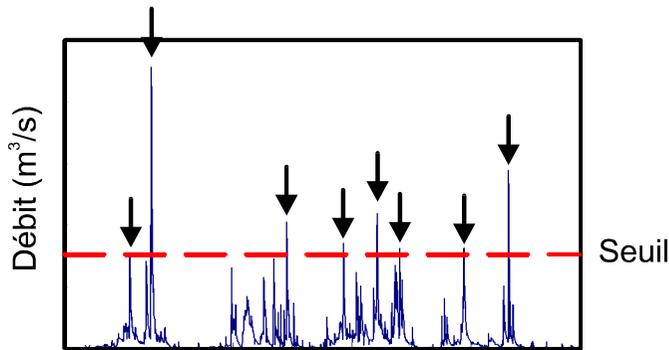
Voisinage hydrologique

1.2 Approches régionales

Modèle Bayésien de combinaison d'informations locale et régionale (Ribatet, 2007)

Les données en site peu jaugé

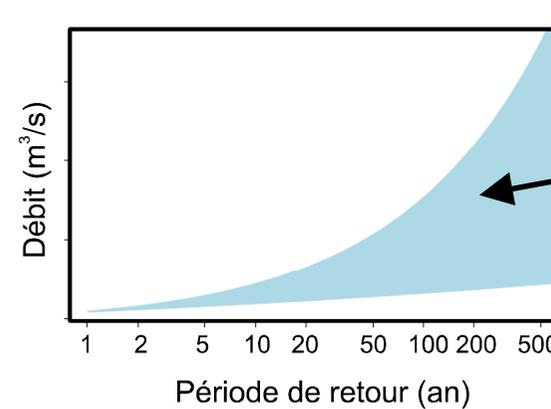
Le nombre d'événements sup-seuil n est insuffisant pour garantir une estimation fiable des quantiles



La théorie des valeurs extrêmes guide le choix de la distribution f dont est issu l'échantillon $x (x_i, i=1, n)$ et la vraisemblance associée $\pi(x; \theta)$

La loi a priori $\pi(\theta)$

- s'appuie sur l'analyse régionale des sites bien renseignés
- fournit une gamme probable des valeurs des paramètres θ de la distribution f des débits et donc des quantiles en tout site de la région



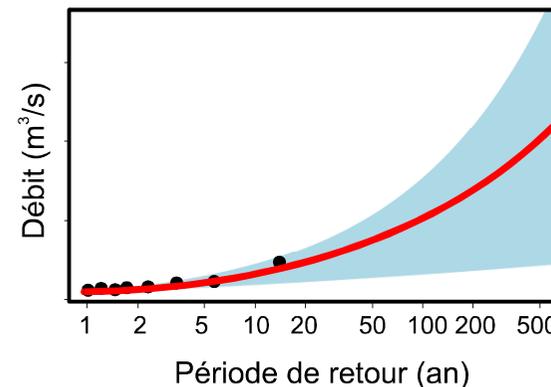
$\pi(\theta)$ synthétise l'information régionale

La loi a posteriori $\pi(\theta|x)$

- est issue du théorème de Bayes

- les médianes marginales de $\pi(\theta|x)$ fournissent une estimation (—) consolidée des paramètres θ et donc des quantiles de crue

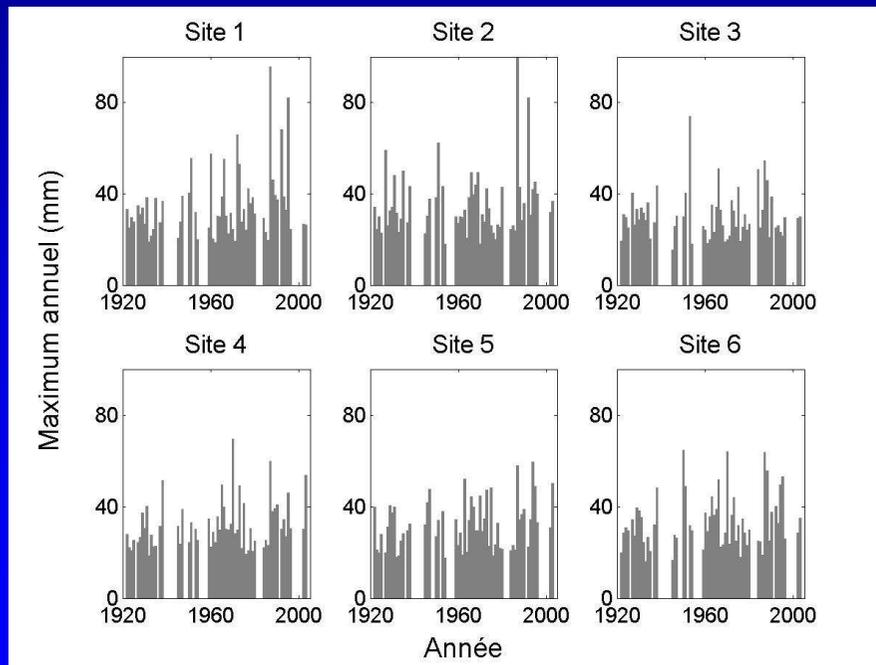
$$\pi(\theta|x) = \frac{\pi(x; \theta)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} \pi(x; \theta')\pi(\theta')d\theta'}$$



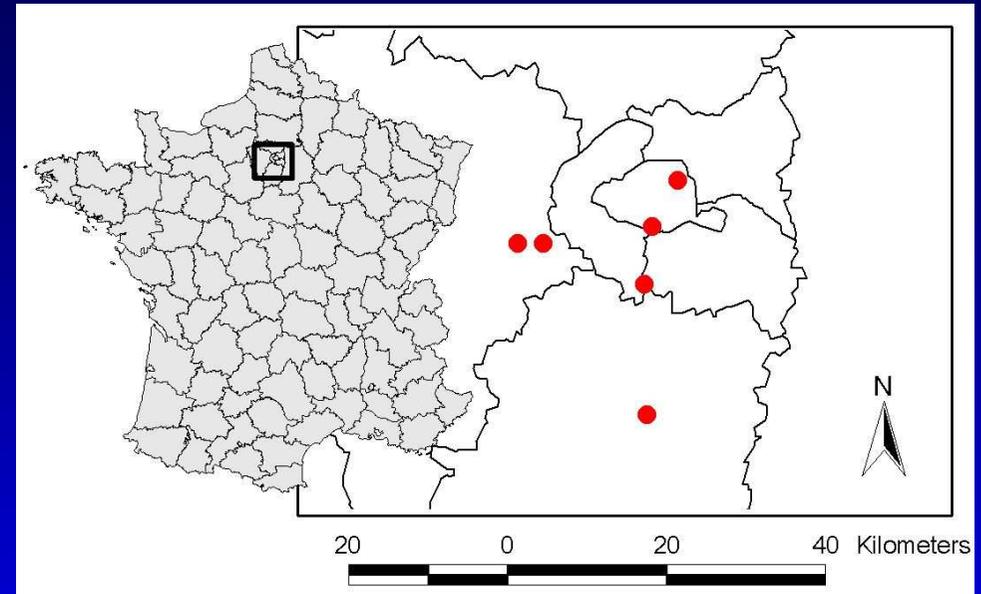
1.2 Approches régionales

Exemple de modèle régional non stationnaire (Renard, 2006)

6 postes pluviométriques
en Île de France



Maxima annuels des pluies journalières
entre 1922 et 2003



$$X_{i,t} \sim GEV(\alpha, \beta(1 + \delta(t - 1921)), \xi)$$

Dépendance spatiale modélisée par une
copule Gaussienne, avec :

$$\begin{cases} \rho_{i,j} = \gamma_0 \exp(-\gamma_1 d_{i,j}) & \text{si } i \neq j \\ \rho_{i,i} = 1 \end{cases}$$

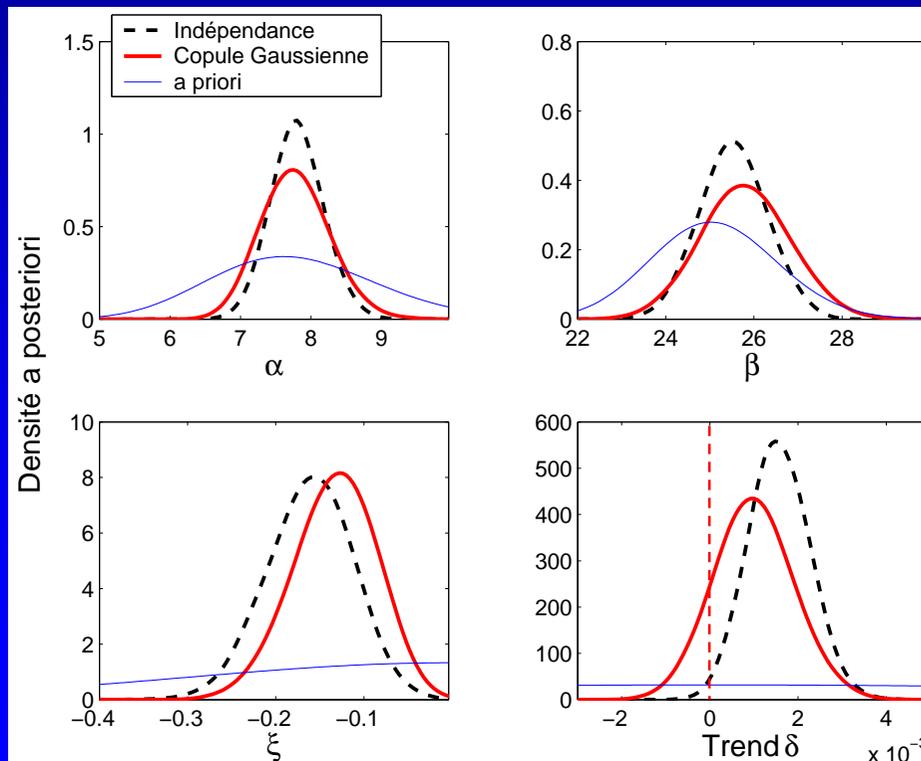
1.2 Approches régionales

Validation du modèle régional

p -valeurs Bayésiennes: acceptables pour les hypothèses de construction du modèle... y compris les dépendances entre paires de sites

➔ Le modèle de dépendance semble acceptable dans le domaine des observations

Distributions *a posteriori* (MCMC): effet d'ignorer la dépendance



$$X_{i,t} \sim GEV(\alpha, \beta(1 + \delta(t - 1921)), \xi)$$

Paramètres d'échelle α et de position β
sous-estimation de la variance
moyenne inchangée

Paramètre de forme ξ
variance inchangée
distribution translatée

Paramètre de tendance δ
sous-estimation de la variance
➔ déplacement de la moyenne

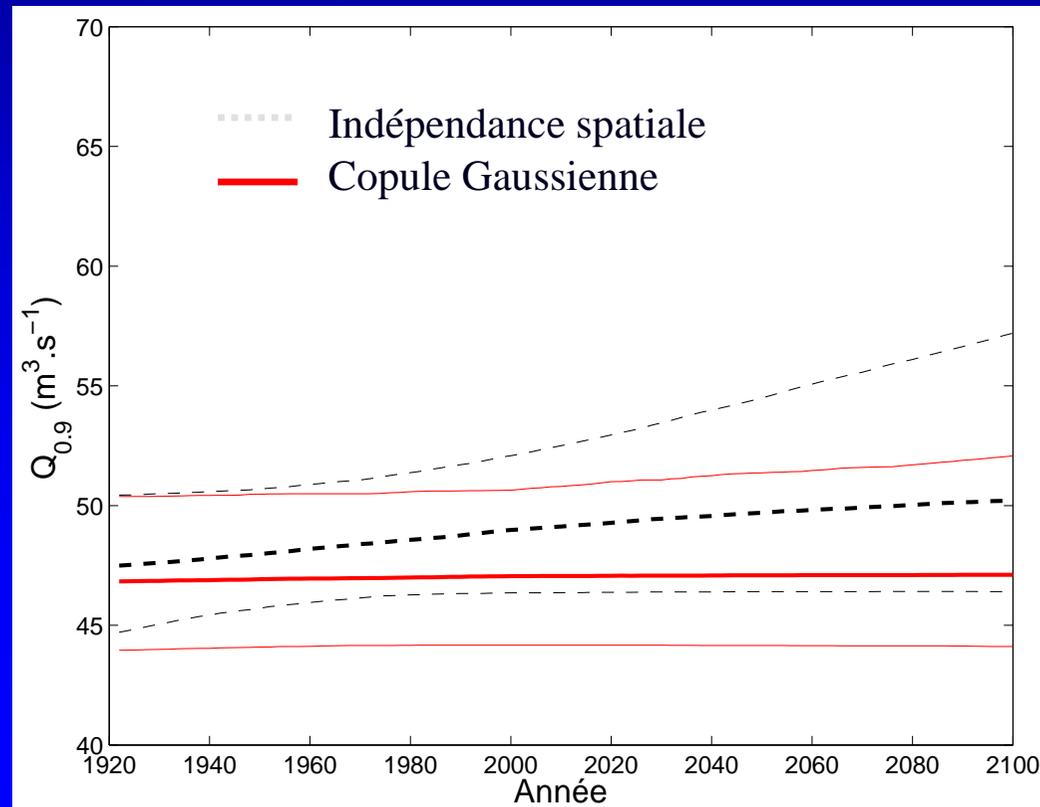
1.2 Approches régionales

Effet de la dépendance spatiale sur la perception d'un changement

$$P_{\text{indépendance}}(\text{changement}|X)=0.48$$

$$P_{\text{copule}}(\text{changement}|X)=0.10$$

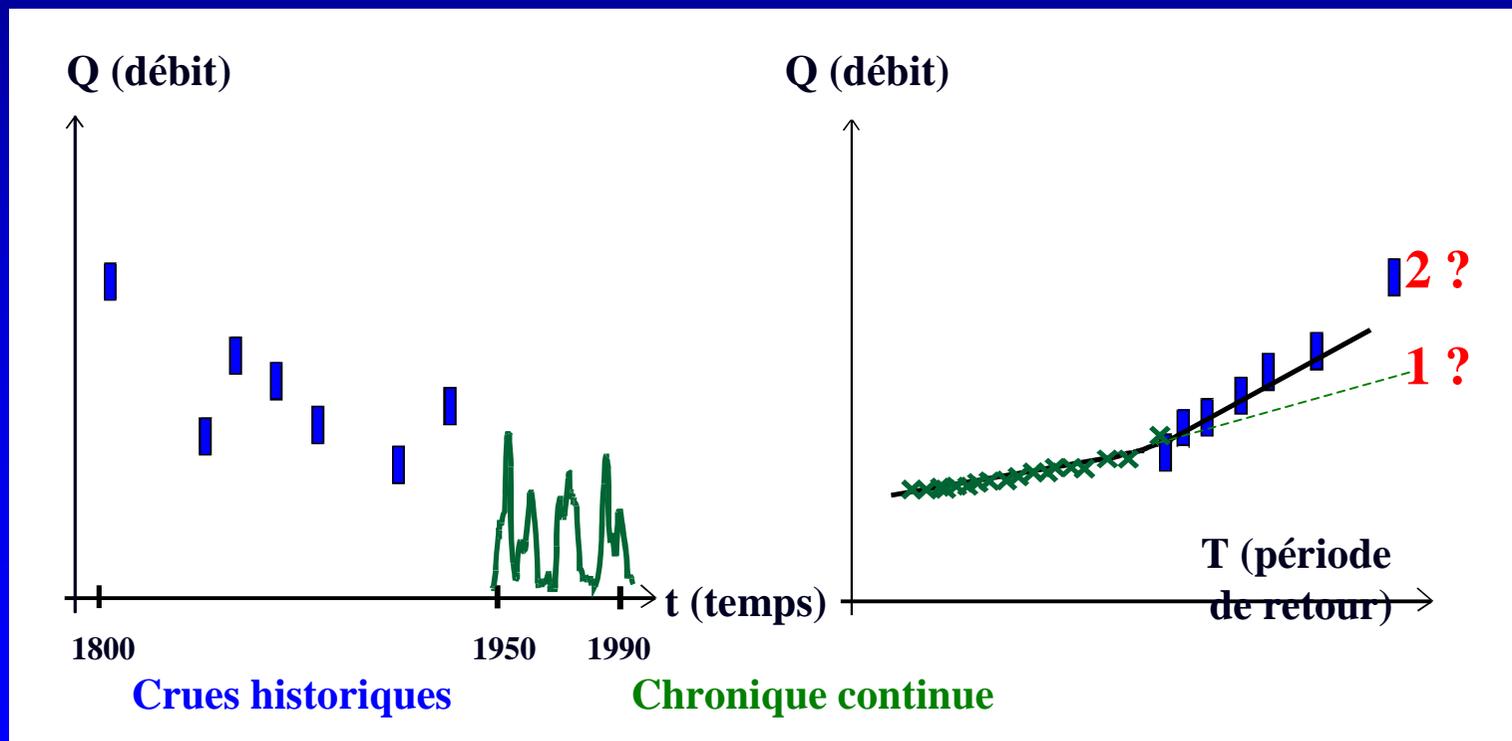
Analyse fréquentielle non stationnaire



1.3 Approche historique

Reconstitution des crues historiques sur quelques siècles

- ✓ Collecte des informations (cote)
- ✓ Analyse hydraulique (débit)
- ✓ Traitement statistique (quantiles)



1.3 Approche historique

Exemple de collecte de cotes de crues sur l'Ardèche (Vallon)

- **Période récente : 1980-2000**

- ✓ banque HYDRO : chronique de hauteurs et débits instantanés

- **XXe siècle : 1892-1979**

- ✓ relevés systématiques à partir de 1892 (création du service d'annonce des crues)

- ✓ comblement des lacunes des fiches mensuelles (examen de plusieurs sources)

- ✓ confrontation avec les données pluviométriques

- ✓ stabilité du zéro de l'échelle et historique du nivellement

- **Période historique : 1644-1891**

- ✓ première échelle à partir de 1857

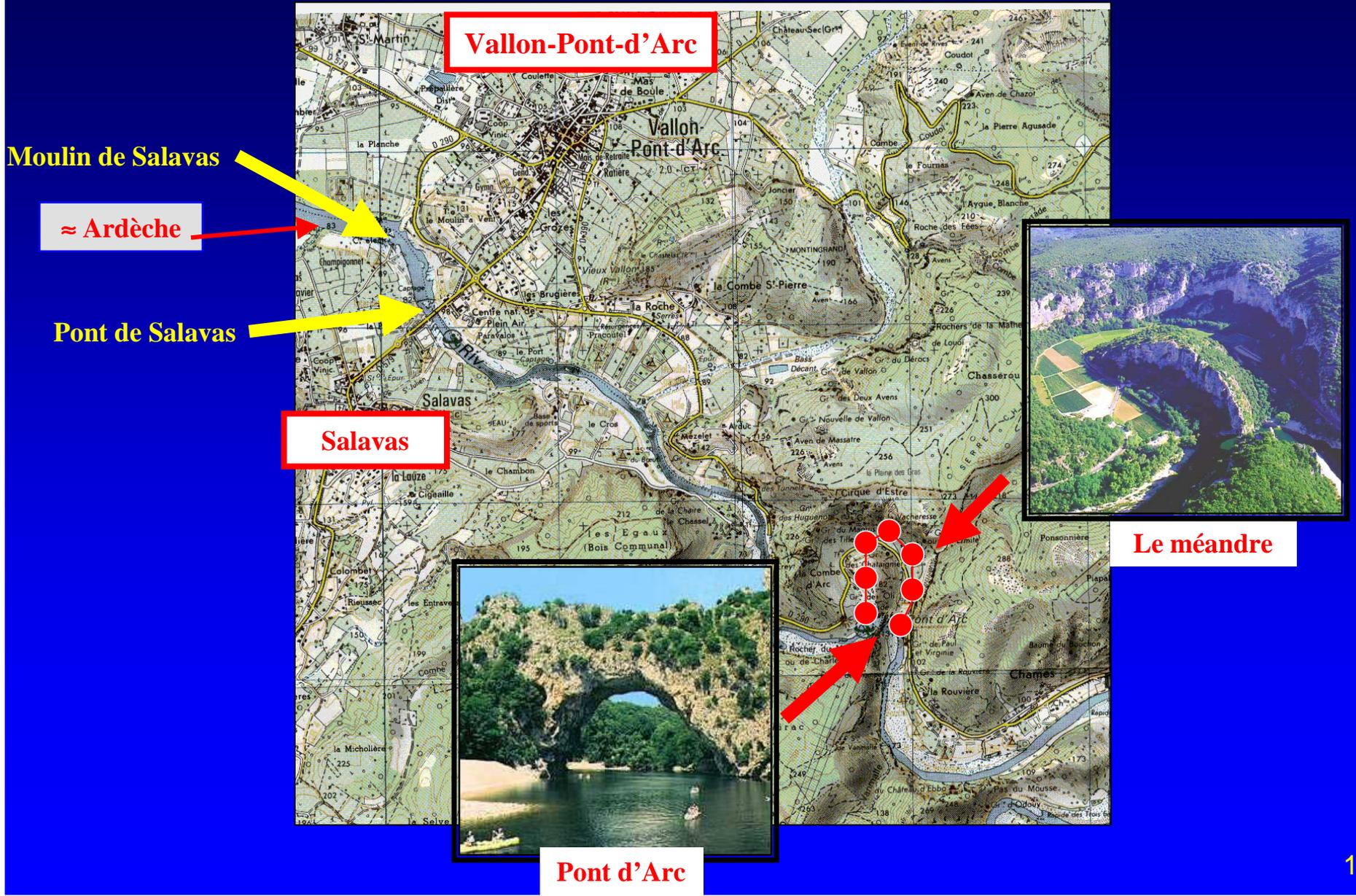
- ✓ marques de crue sur le moulin de Salavas

- ✓ mention de crues historiques (rapports Ingénieurs des Ponts & Chaussées)

Cote	17.3	16.1	16.0	14.5	14.0	13.5	13.1	11.3	11.1	*	10.0	9.4	9.0
Année	1890	1827	1644	1878	1772	1857	1846	1859	1891	1853	1872	1888	1861

1.3 Approche historique

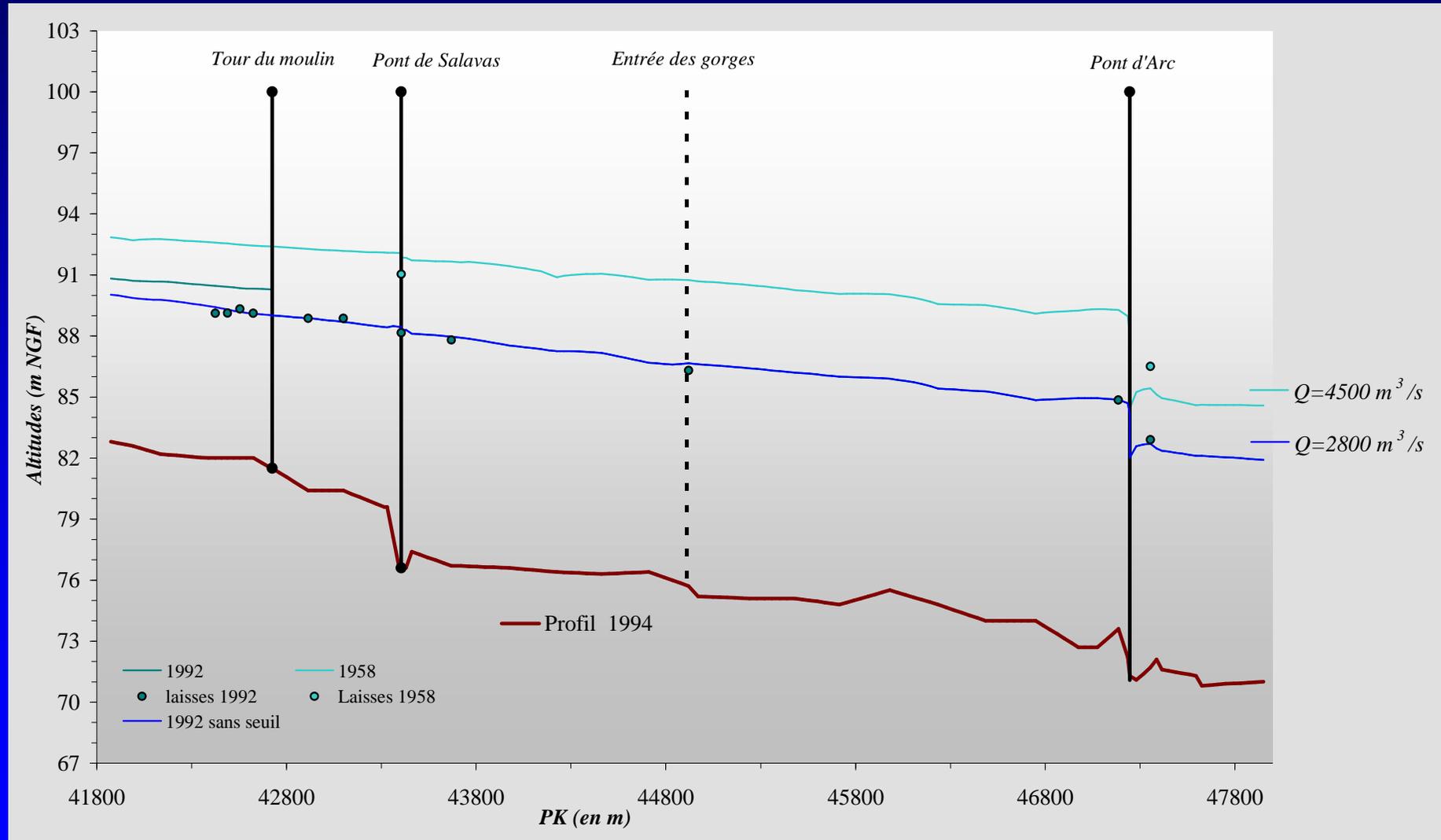
Modélisation hydraulique du secteur de Vallon



1.3 Approche historique

Calage du modèle hydraulique à Vallon

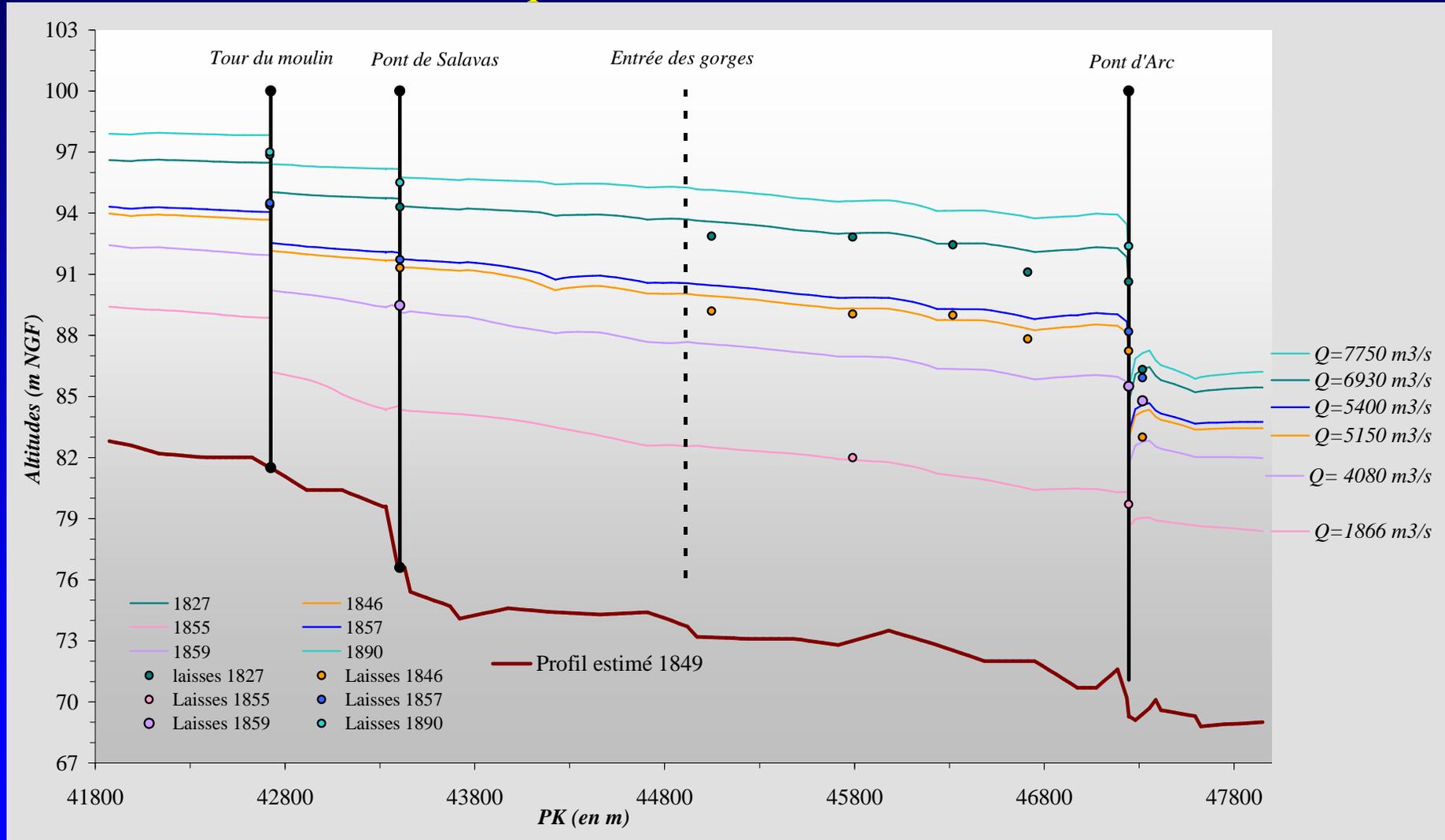
- Crue du 22 septembre 1992 ($2800 \text{ m}^3/\text{s}$)



1.3 Approche historique

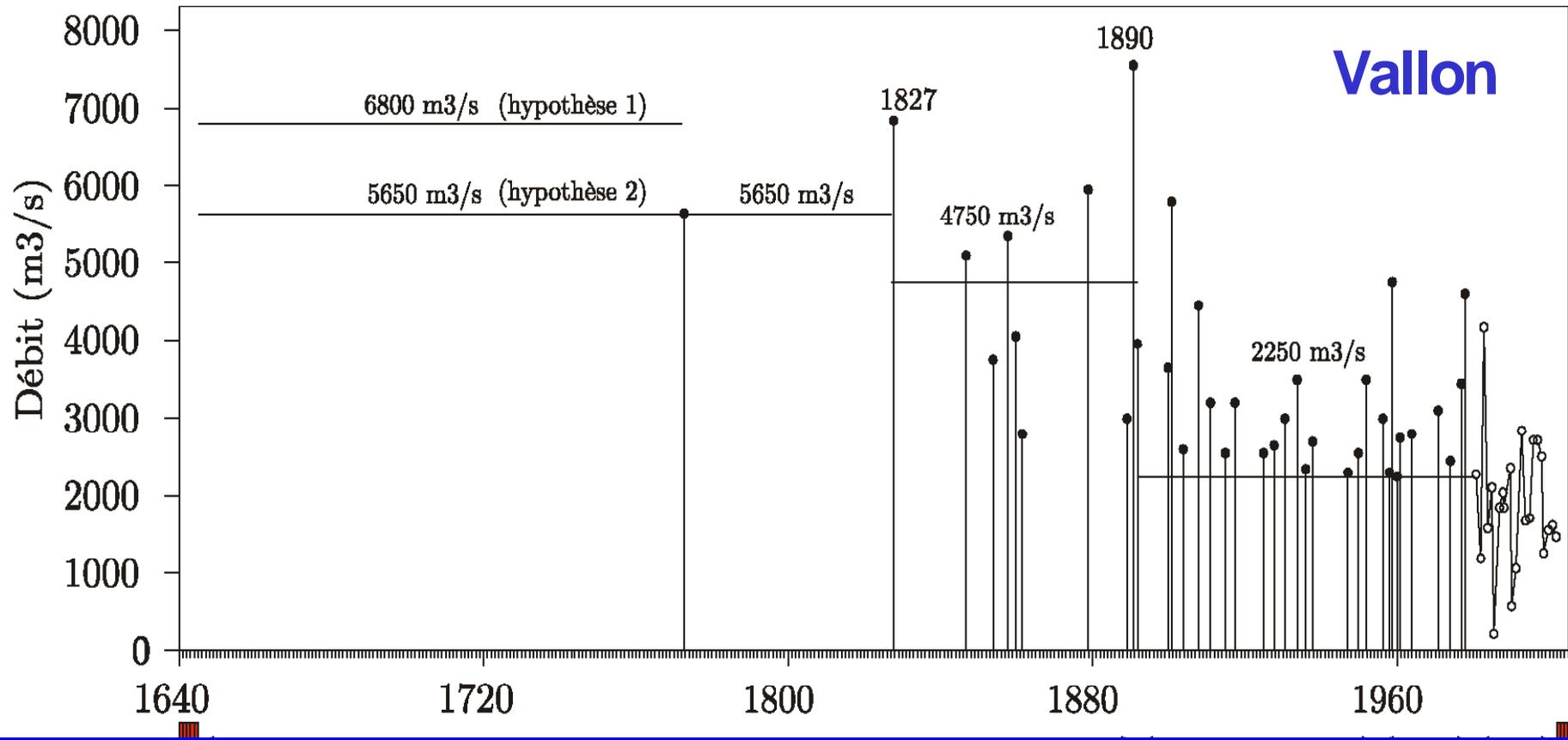
Test du modèle hydraulique à Vallon

- Laisses de 6 crues historiques (1827, 1846, 1855, 1857, 1859, 1890)



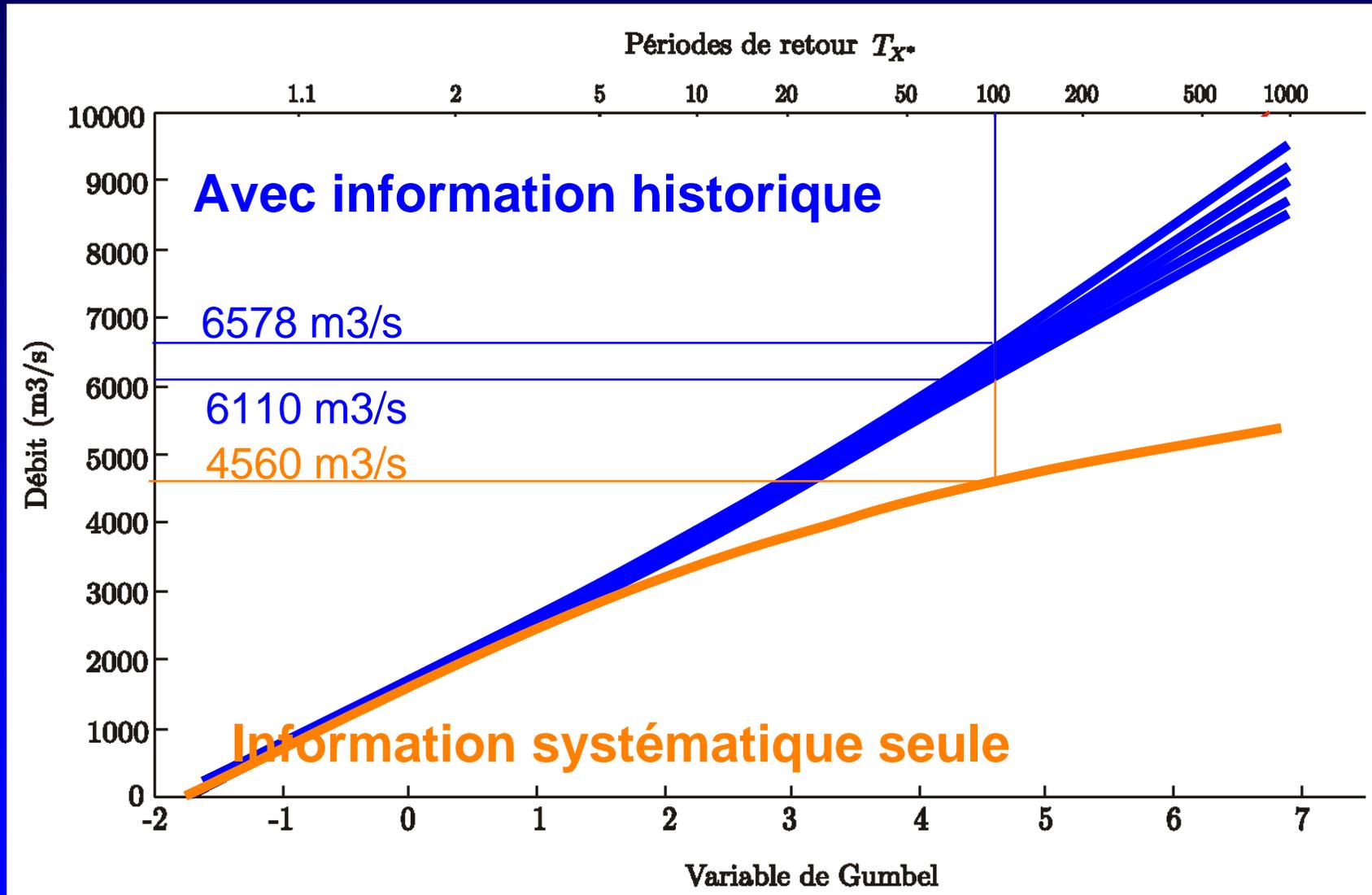
1.3 Approche historique

Définition de seuils d'exhaustivité



1.3 Approche historique

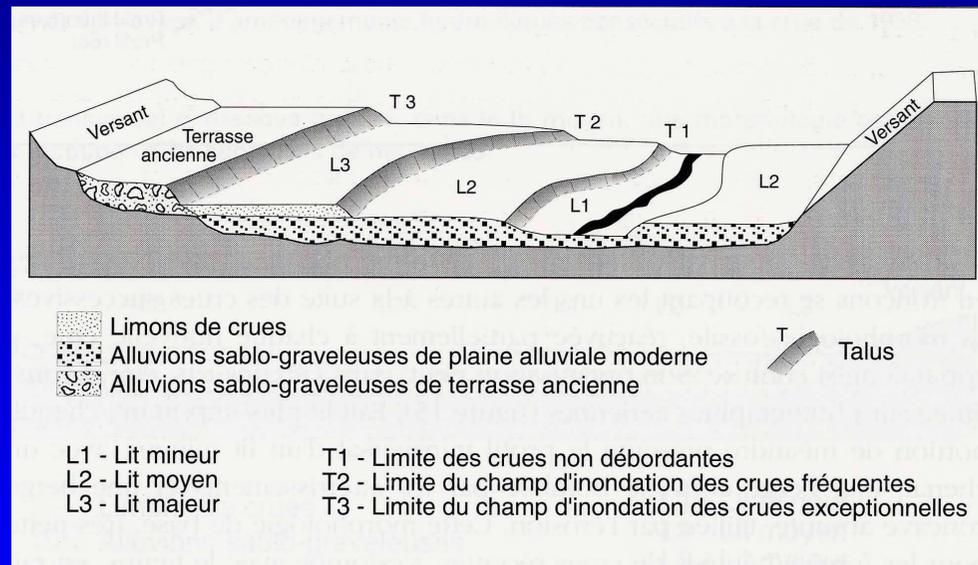
Estimation de la crue centennale à Vallon (Naulet, 2002)



1.4 Approche naturaliste

Hydro-géomorphologie

- ✓ Analyse des unités principales du lit d'écoulement
cartes topo, stéréographies aériennes, reconnaissances de terrain
- ✓ Extension maximale du champ d'inondation

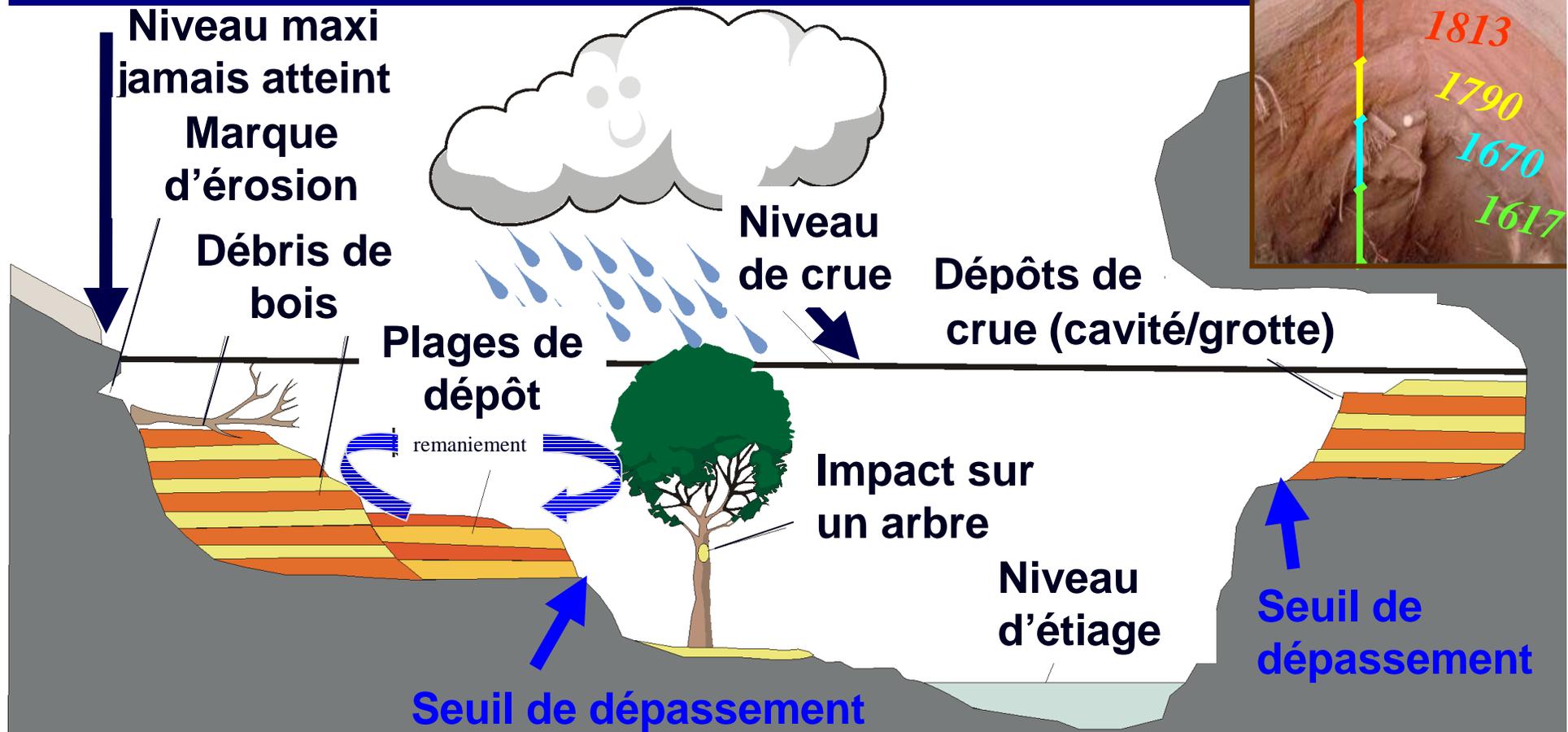


Garry G., et al. (1996). *Cartographie des zones inondables : approche hydro-géomorphologique*

1.4 Approche naturaliste

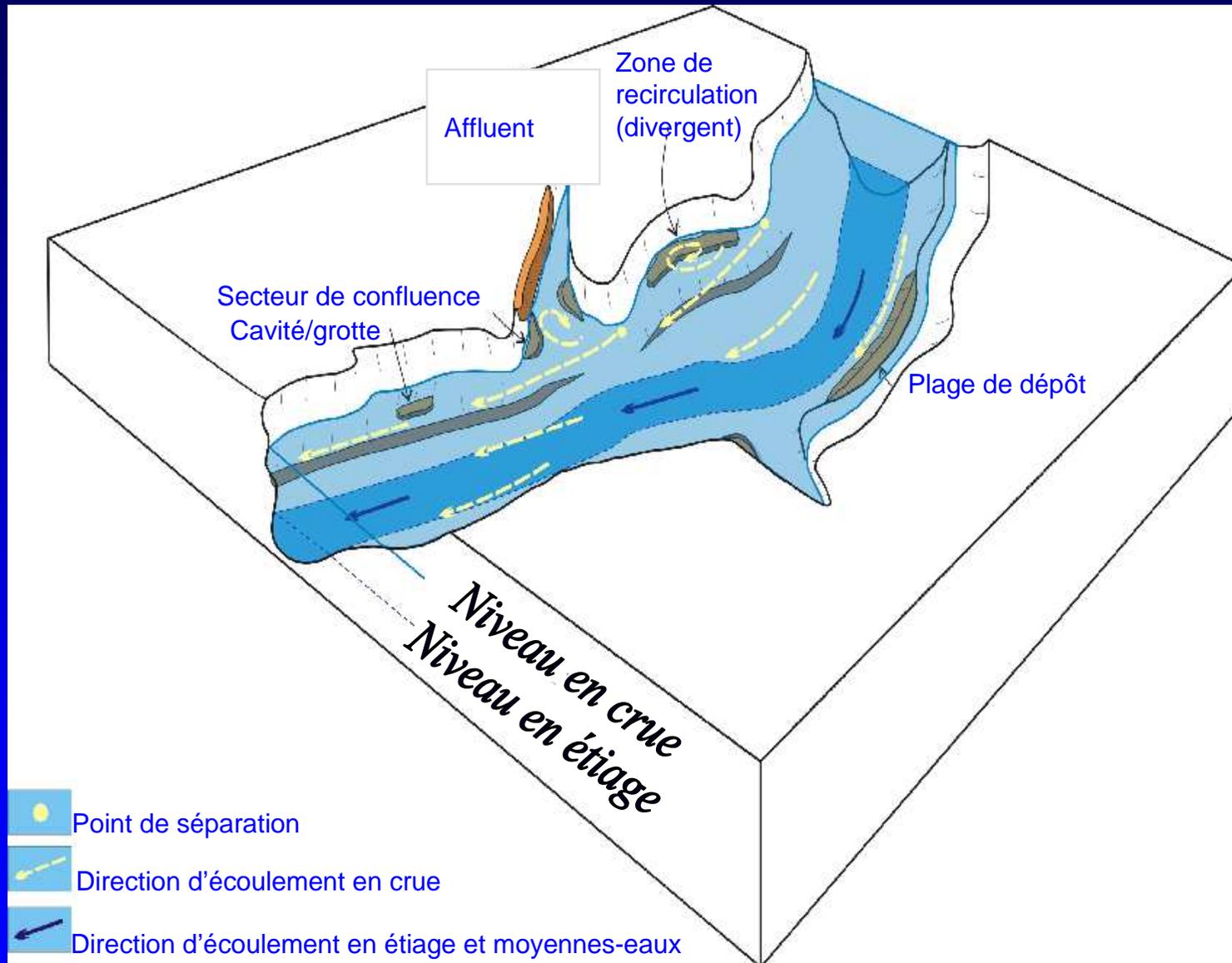
Paléohydrologie

- ✓ Analyse des dépôts laissés par les crues (champ d'inondations, grottes)
analyse stratigraphique, datation des dépôts
- ✓ Reconstitution des débits de crue et traitement statistique



1.4 Approche naturaliste

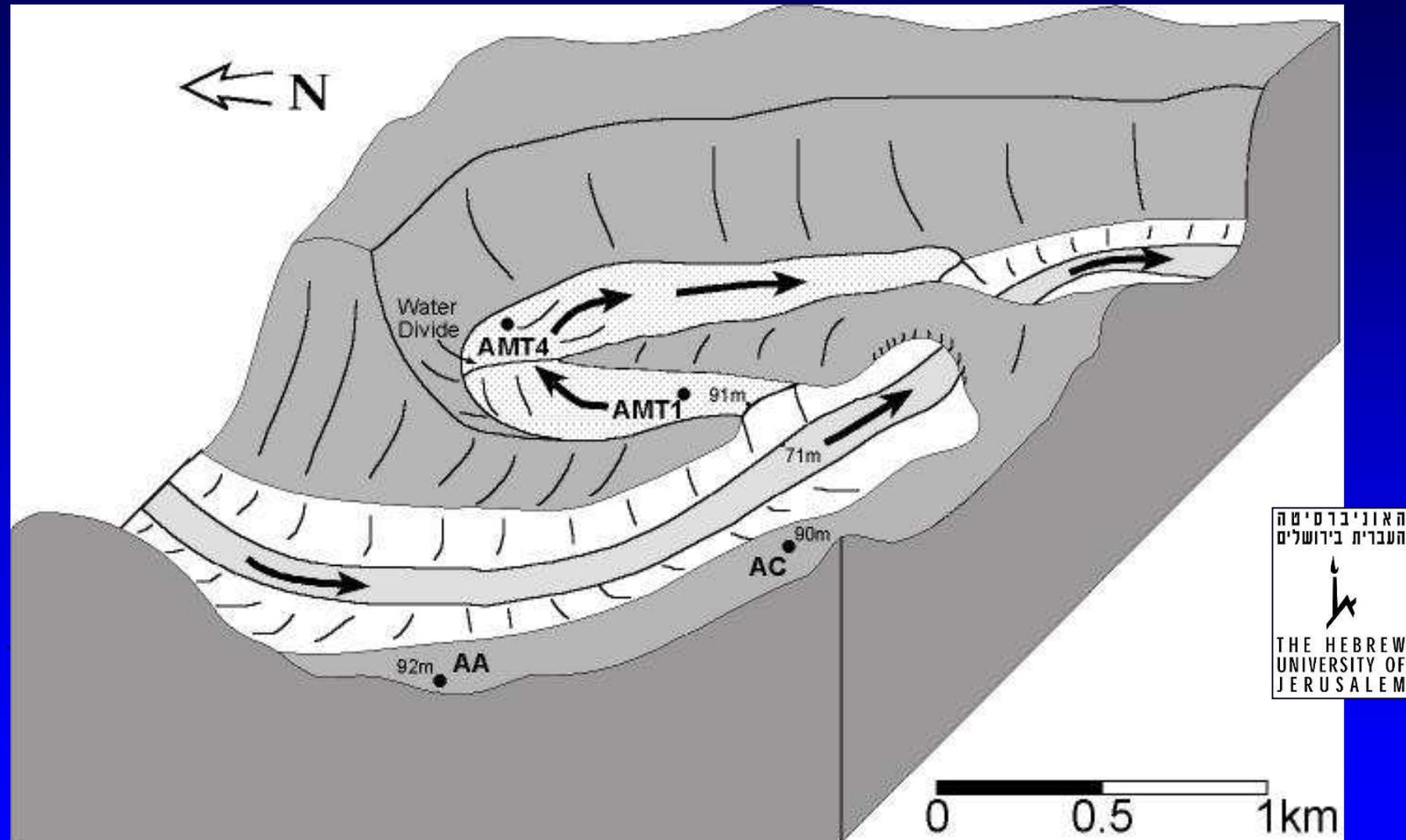
Zones privilégiées de dépôt de sédiments de crue



(repris de Benito et Thorndycraft, SHF Lyon, mars 2006)

1.4 Approche naturaliste

Particularité du site de Vallon



⇒ le méandre n'est actif que pour les crues exceptionnelles

1.4 Approche naturaliste

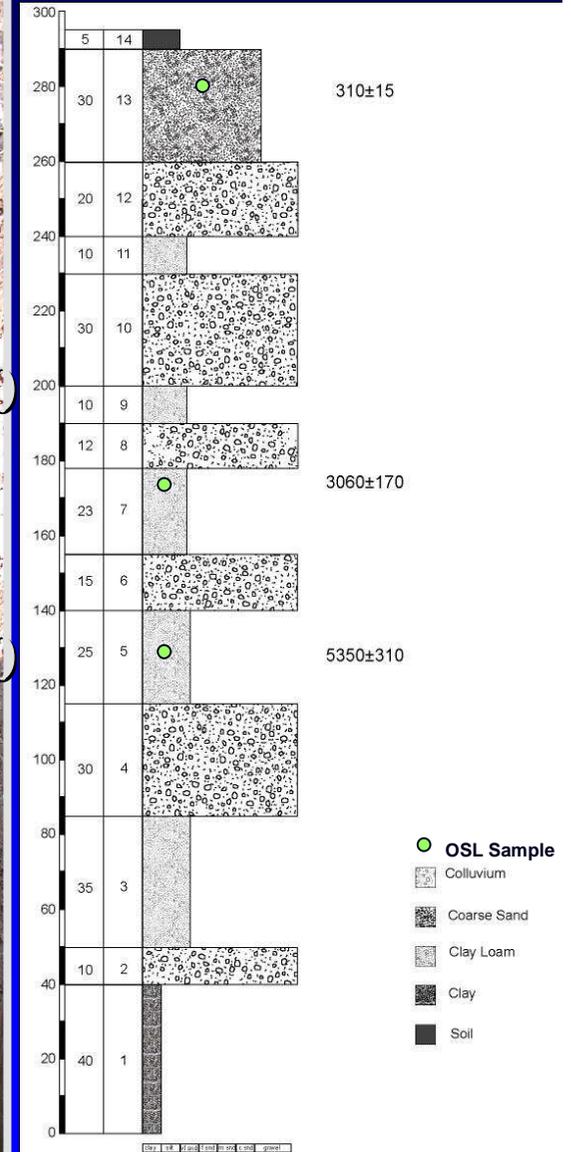
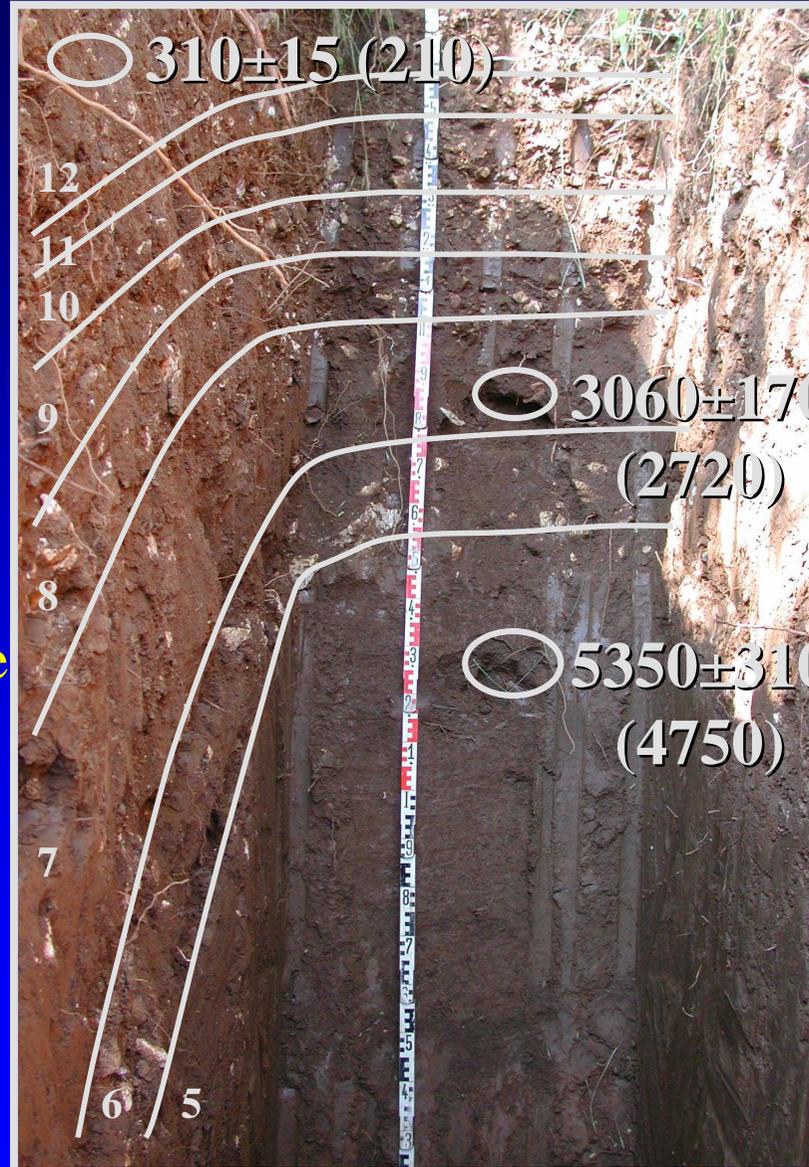
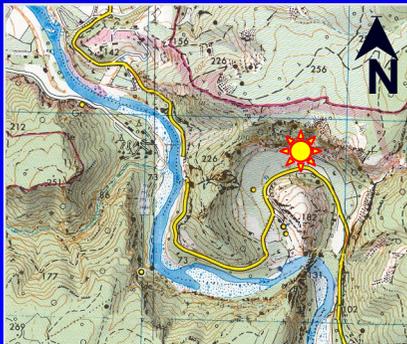
Analyse stratigraphique et datation

Séparation en unités :

- ✓ granulométrie
- ✓ texture, couleur
- ✓ pédologie

Datation :

- ✓ C14
- ✓ thermoluminescence



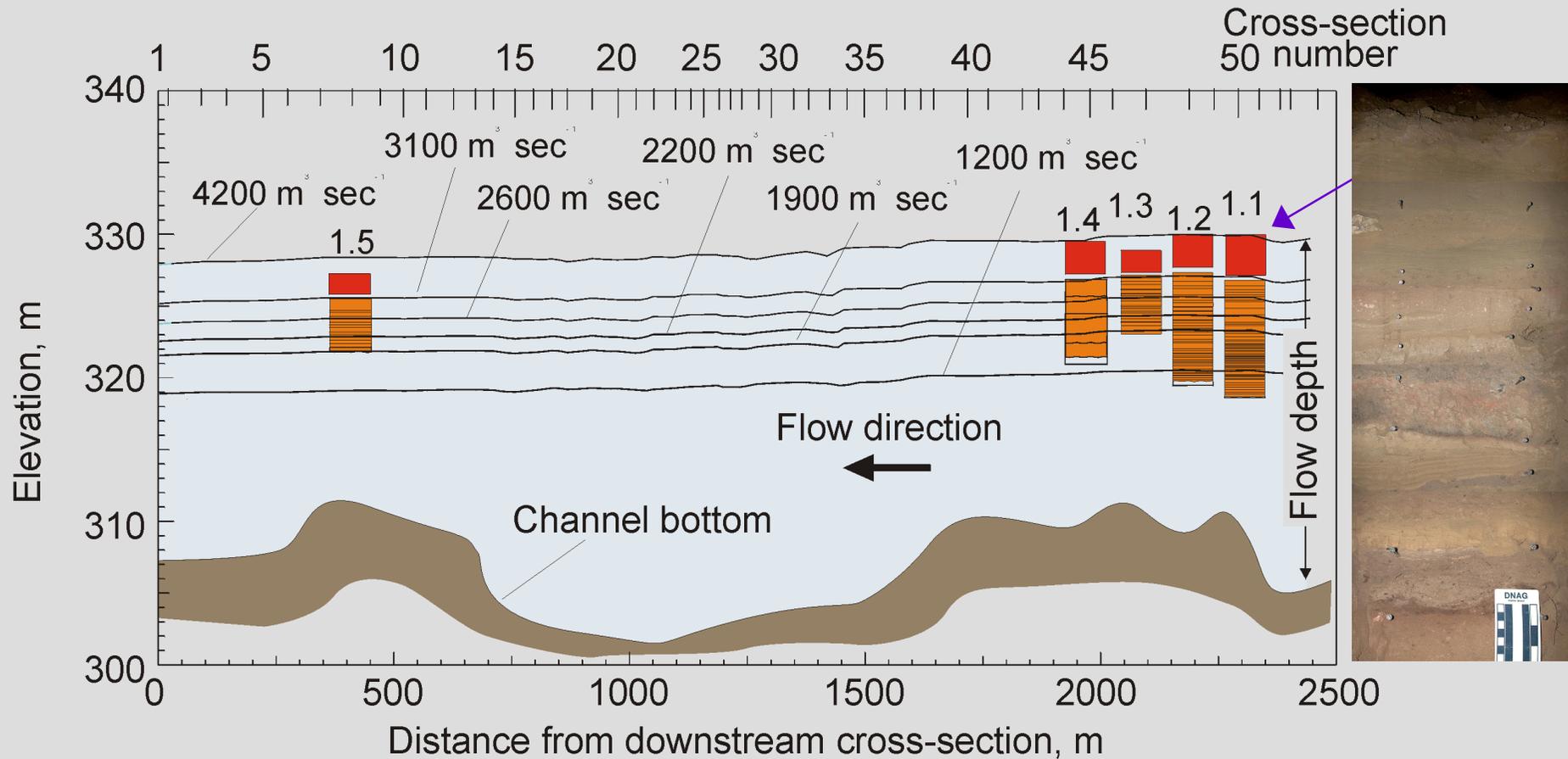
(repris de Sheffer *et al.*, PHEFRA Barcelone, 2002)

Site AMT4

23

1.4 Approche naturaliste

Cohérence entre sites et reconstitution d'un débit

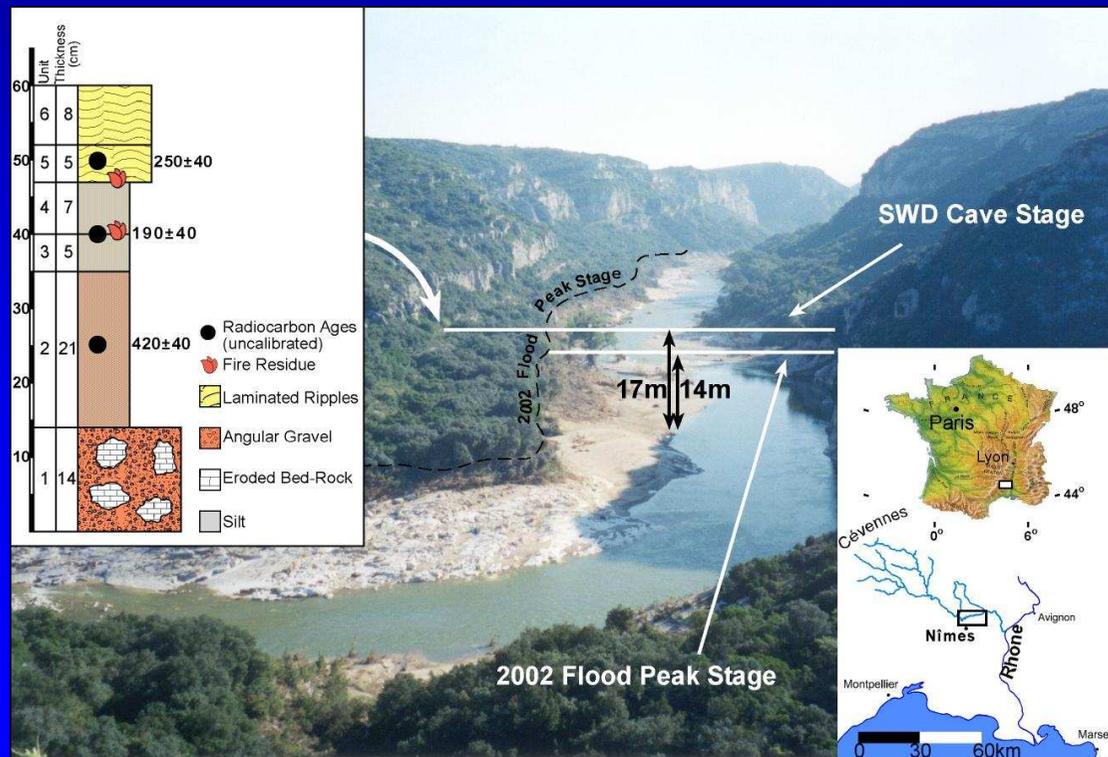


(Llobregat river, repris de Benito et Thorndycraft, SHF Lyon, 2006)

1.4 Approche naturaliste

Exemple de résultats

- Cohérence sur l'Ardèche entre les crues datées à l'aide des sédiments de crue et celles recensées historiquement aux XVIII et XIXe siècles
- Mise en perspective d'une crue historique sur une large échelle temporelle
 - ✓ Ardèche : depuis 2000 ans, aucune trace de crue > niveau crue de 1890
 - ✓ Gard : au moins 5 crues > niveau crue 2002 (dont 3 sur période 1400-1800)



(repris de Sheffer *et al.*, EOS-AGU, 2003)

1.5 Approches basées sur les pluies

- **Méthode du Gradex**

- ✓ Modèle probabiliste simplifié basé sur des hypothèses hydrologiques
 - * les crues fortes sont provoquées par des pluies fortes
 - * le rendement de la transformation pluie-débit est borné
- ✓ Parallélisme entre la distribution des pluies fortes et des crues fortes

- **Simulateur d'averses couplé à un modèle pluie-débit**

- ✓ Calage d'un modèle de génération d'averses, et d'un modèle pluie-débit
- ✓ Génération de longues séries de pluie et de débit
- ✓ Estimation des quantiles directement à partir des séries simulées

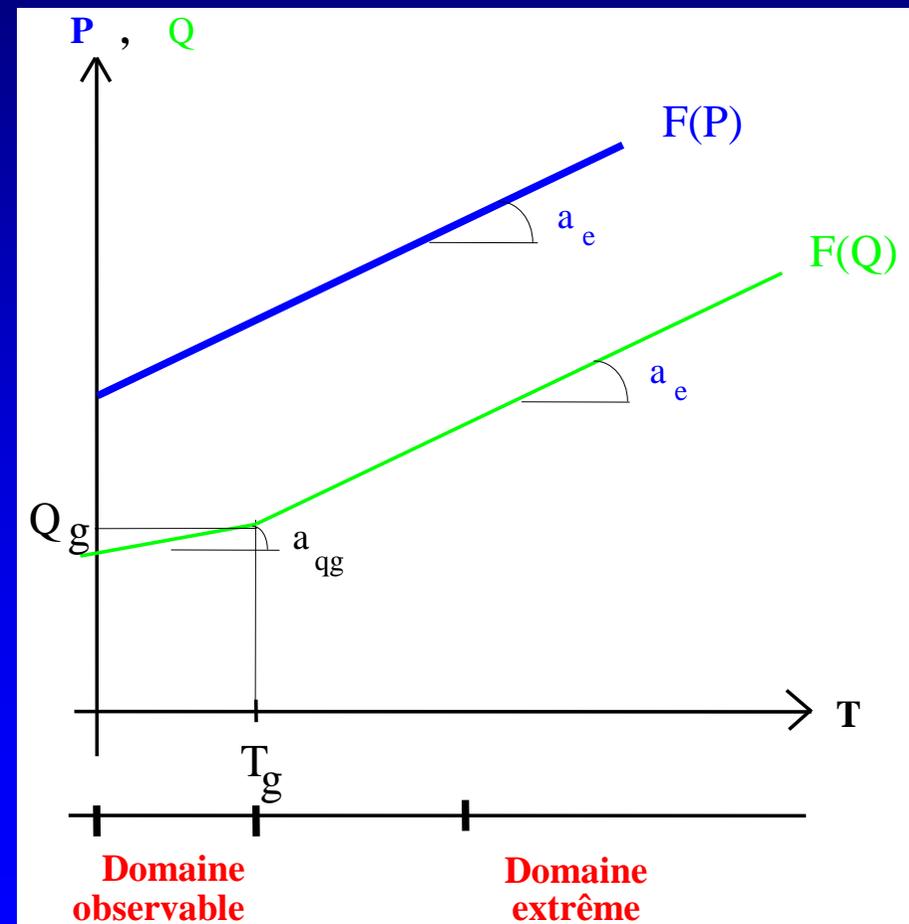
1.5 Approches basées sur les pluies

Principe de base de la méthode du Gradex (Guillot et Duband, 1968)

Déduire le comportement asymptotique de la distribution des volumes de crues extrêmes de celle des pluies extrêmes

• Hypothèses

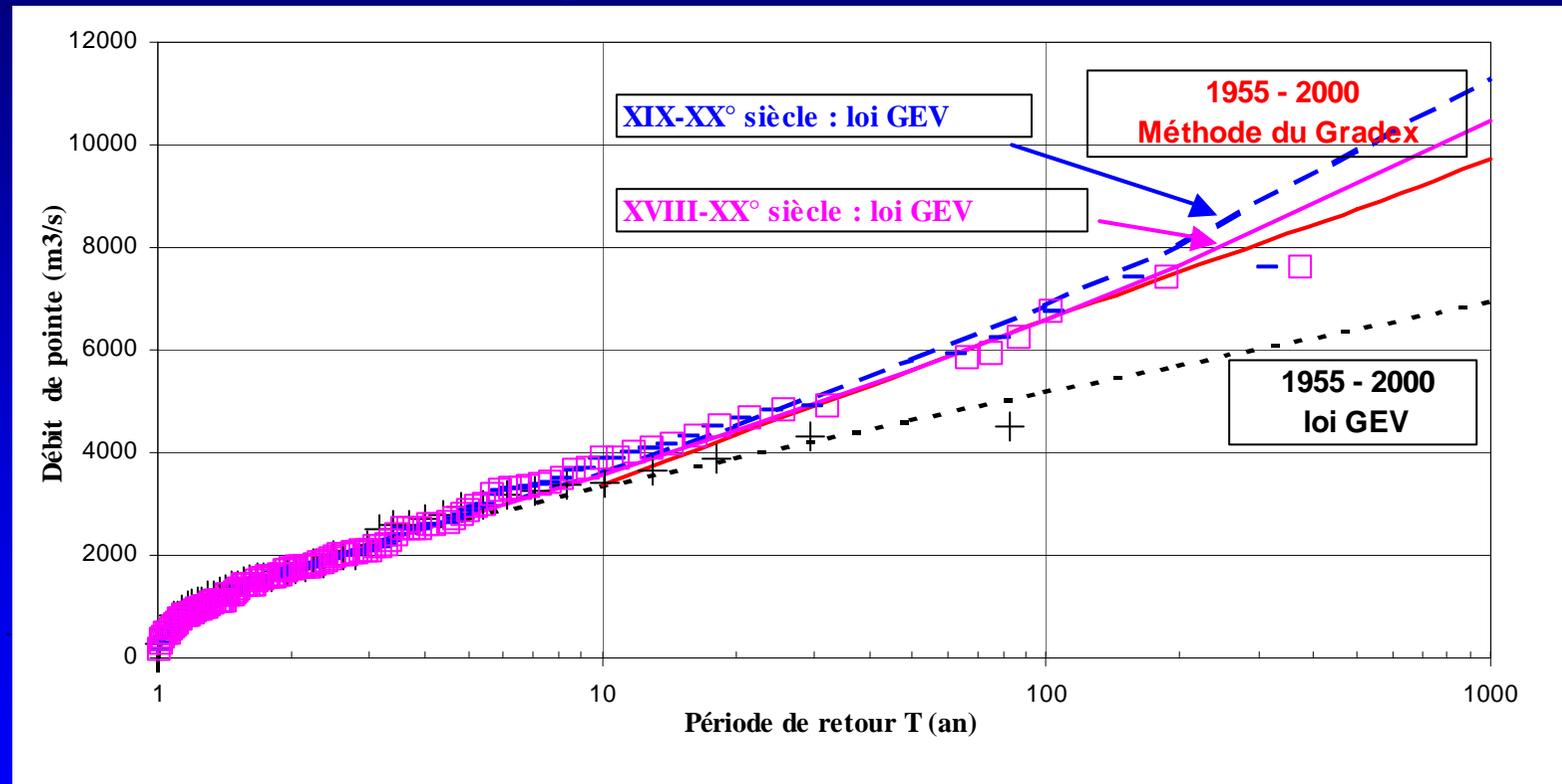
- 1) Décroissance exponentielle de la probabilité des pluies maximales
- 2) Distribution de la rétention du sol tend vers une valeur limite
- 3) Invariance de la forme des hydrogrammes pour les fortes crues



1.5 Approches basées sur les pluies

Extrapolation de la distribution des crues (Ardèche à St-Martin)

- (1) avec une loi GEV (1955-2000)
- (2) avec la méthode du Gradex (1955-2000)
- (3) avec information historique (XVIII-XXe siècle)



- Distribution des crues (1955-2000)
 - Q100 = 5200 m³/s (débits)
 - 6600 m³/s (Gradex)
- Avec information historique
 - ✓ 1827-1954 : Q100 = 7300 m³/s
 - ✓ 1645-1954 : Q100 = 6900 m³/s²⁸

Evolutions de la méthode du Gradex (EDF/DTG Grenoble)

- Principalement sur la distribution des pluies maximales
calcul d'une lame spatiale (phénomène d'abattement)
loi mélange d'exponentielles calée sur les pluies journalières
composition de lois saisonnières

Estimation des crues extrêmes :

- ☺ L'hypothèse très conservatrice d'une saturation immédiate au-delà d'un seuil est réputée compensée par une sous-estimation des pluies fortes
- ☺ Pas d'alarme depuis 30 ans sur une sous-estimation des crues
- ☹ Critiques sur l'estimation de l'aléa pluviométrique et la transformation pluie-débit

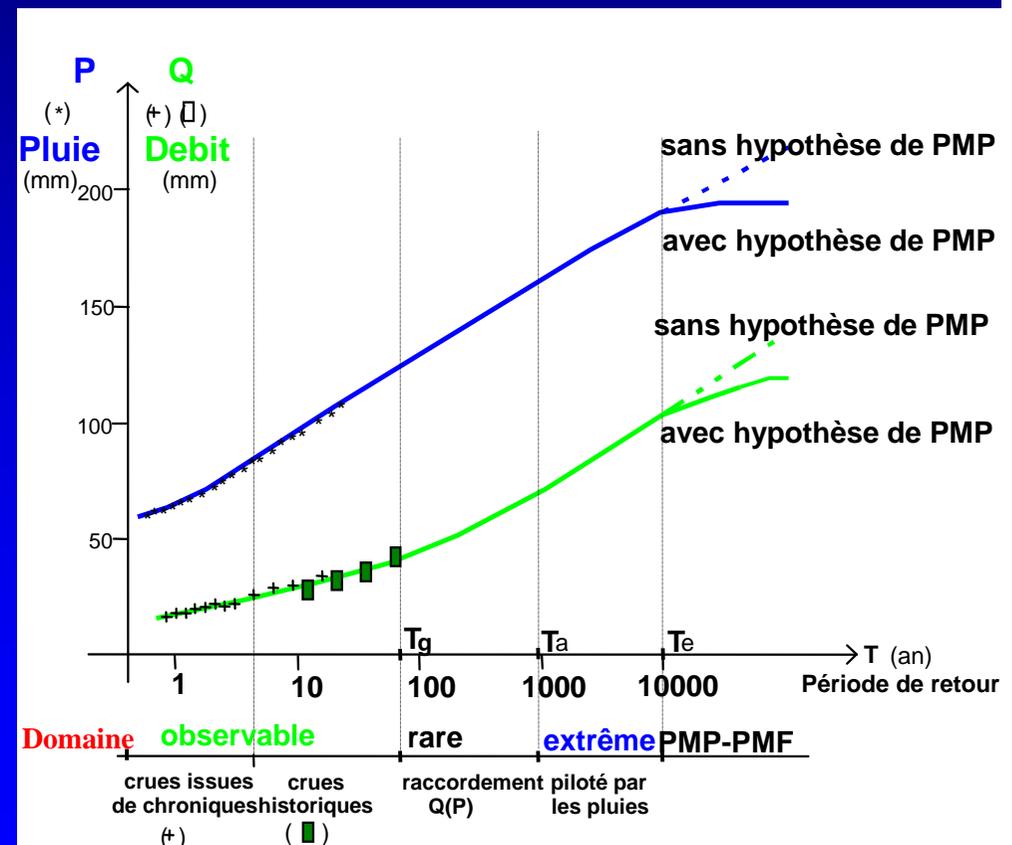
1.5 Approches basées sur les pluies

Principes du modèle Agregee (Margoum, 1992, Cemagref Lyon)

Reprise des hypothèses du Gradex pour les crues extrêmes
Elargissement du domaine fréquentiel ($T < 1\ 000$ ans) et de l'objet d'étude (hydrogramme au lieu du débit de pointe)

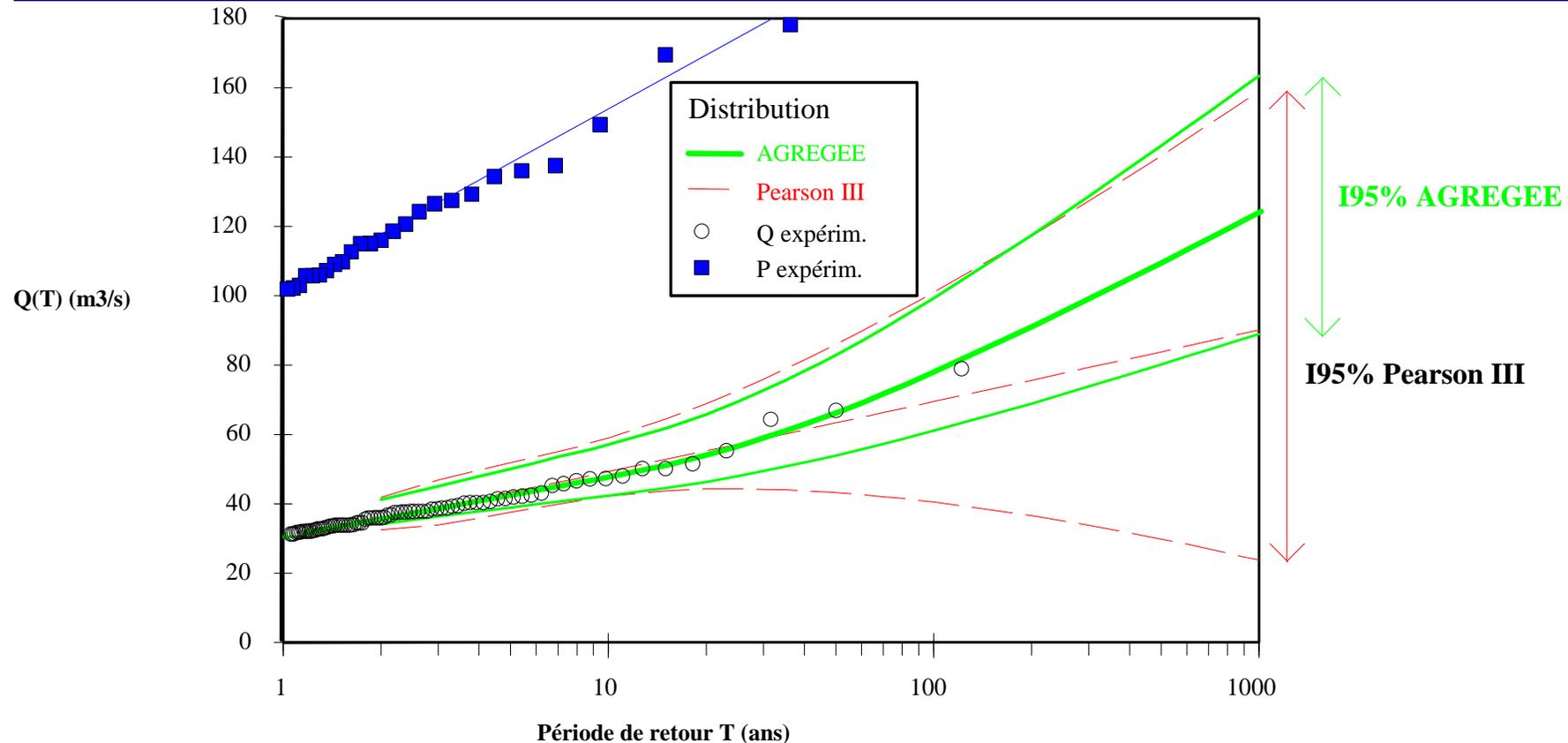
• Hypothèses

- 1) Comportement asymptotiquement exponentiel des pluies maximales
- 2) Evolution progressive de la capacité de rétention du sol
- 3) Equivalence au-delà d'un certain seuil, entre lames d'eau précipitée et ruisselée, pour plusieurs durées



1.5 Approches basées sur les pluies

Intervalles de confiance sur les crues avec ou sans information pluviométrique (Inn à St-Moritzbad)



Sur cet exemple, réduction de moitié de la largeur de l'intervalle de confiance :

- 25 ans de débit (Loi Pearson III) + 25 ans de pluie (modèle Agregée)
avec un contrôle a posteriori sur la série expérimentale 1907-1987

Principes de la méthode Schadex

(Paquet, Gailhard, Garcon, 2006, EDF/DTG)

Estimation de l'aléa pluviométrique par type de temps

Procédure de simulation hydrologique des débits par tirage d'averses
et conversion par un modèle pluie-température-débit

Passage aux débits de pointe à partir de coefficients de forme de crue

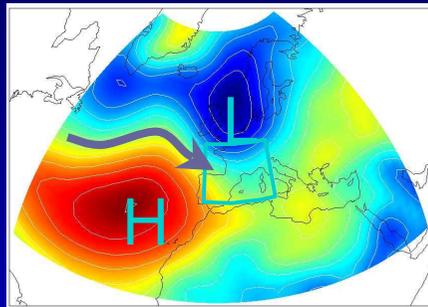
• Hypothèses

- 1) Comportement exponentiel des pluies maximales par saison/type de temps
Modèle d'averses défini à l'aide d'une pluie centrale et de deux pluies adjacentes
- 2) Méthode de probabilisation des débits simulés, en décrivant l'aléa
« saturation des sols » par un parcours pas à pas de la chronique observée
- 3) Existence d'une forme de crue moyenne

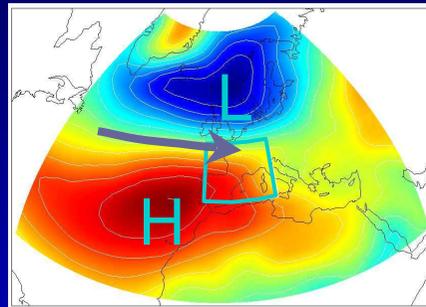
1.5 Approches basées sur les pluies

1. Distribution des pluies centrales

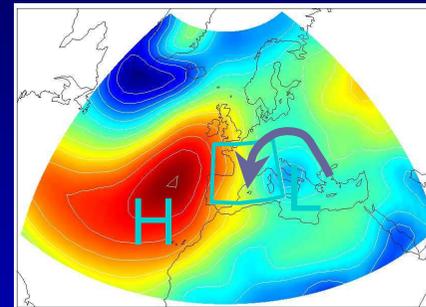
Composition de lois exponentielles par type de temps et saison



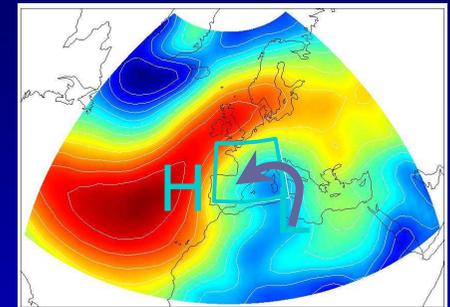
1 Onde atlantique (7%)



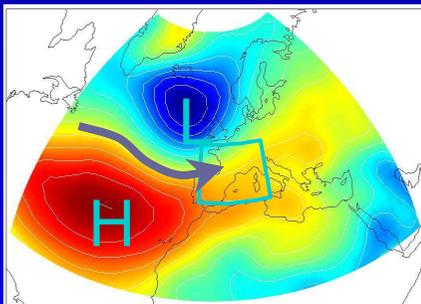
2 Océanique stationnaire (24%)



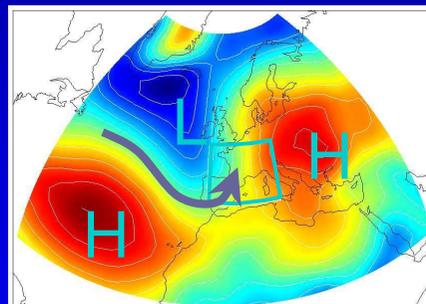
5 Nord-Est (7%)



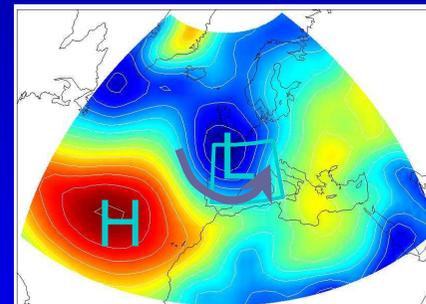
6 Retour d'Est (6%)



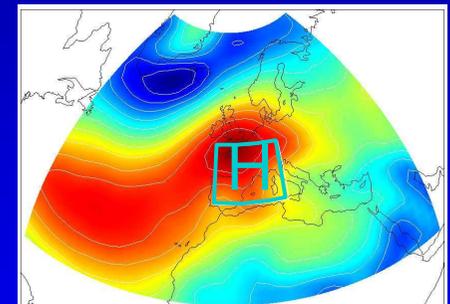
3 Sud-Ouest (8%)



4 Sud (18%)



7 Dépression centrale (3%)



8 Anticyclone (27%)

⇒ Classification en 8 types de temps (géopotential 700 et 1000 hPa)

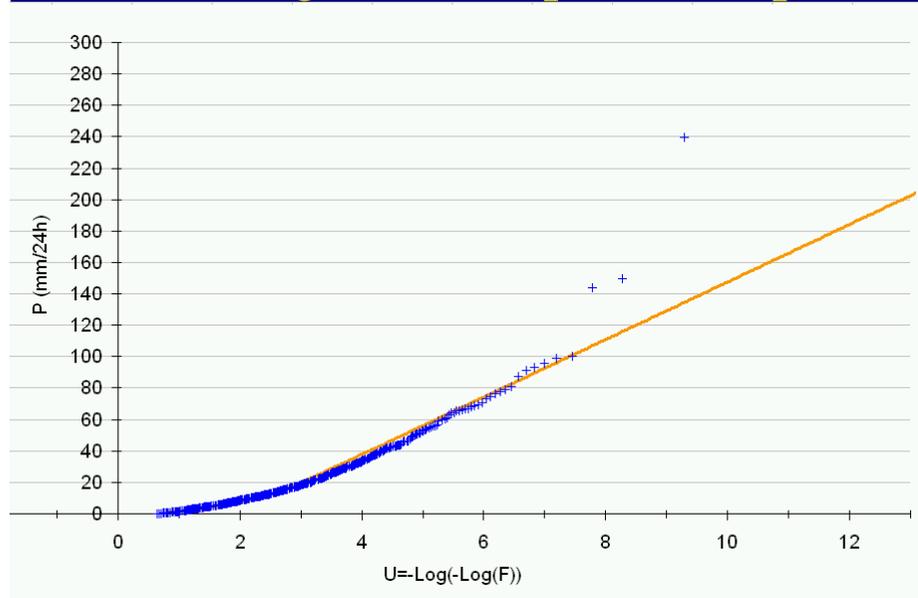
Rattachement de chaque jour de la période 1953-2002 à un type de temps

1.5 Approches basées sur les pluies

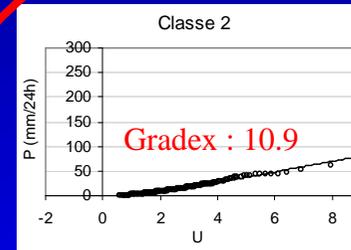
1. Distribution des pluies centrales

Composition de lois exponentielles par type de temps et saison

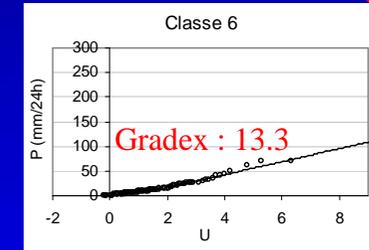
Haute-Ariège : L'Hospitalet (sept-déc.)



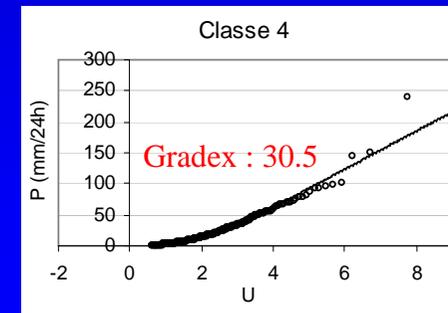
⇒ Doute sur la queue de distribution



Océanique



Retour d'Est



Sud

Somme de deux exponentielles sur PJ

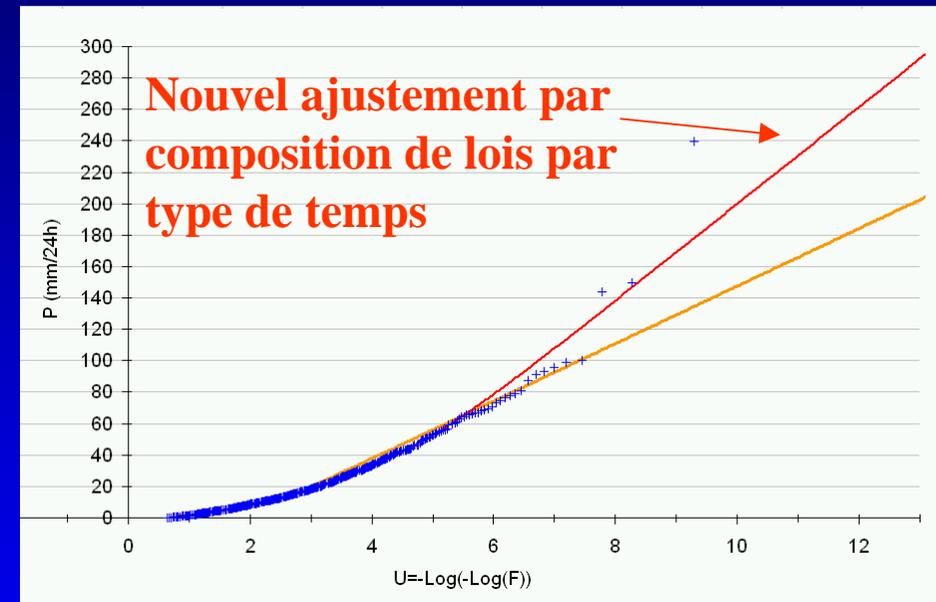
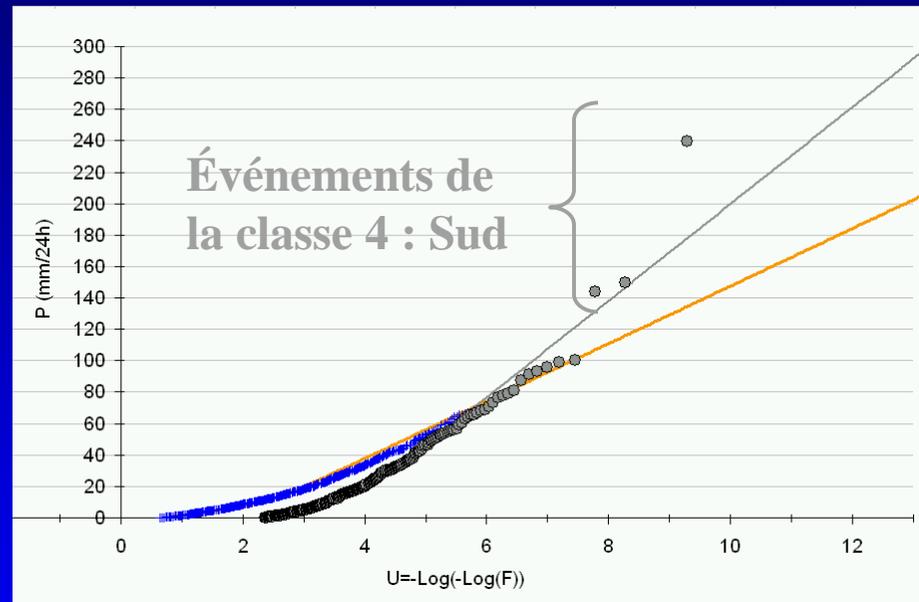
Analyse par type de temps :
loi exponentielle sur valeurs supérieures
à un seuil

1.5 Approches basées sur les pluies

1. Distribution des pluies centrales

Composition de lois exponentielles par type de temps et saison

Haute-Ariège : L'Hospitalet (sept-déc.)

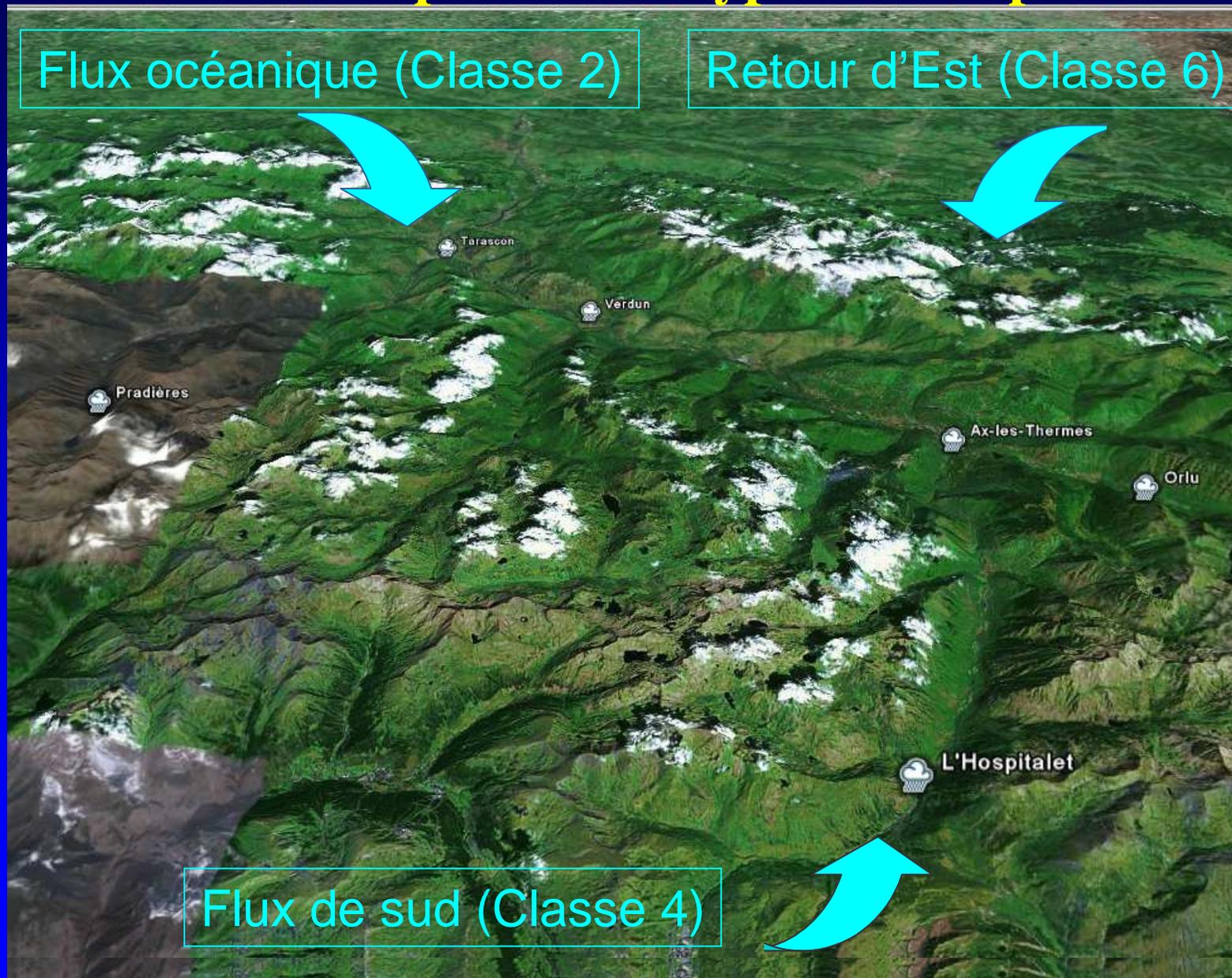


Queue de distribution expliquée par un type de temps

→ Meilleure estimation de l'aléa pluviométrique (sous-populations homogènes)

1.5 Approches basées sur les pluies

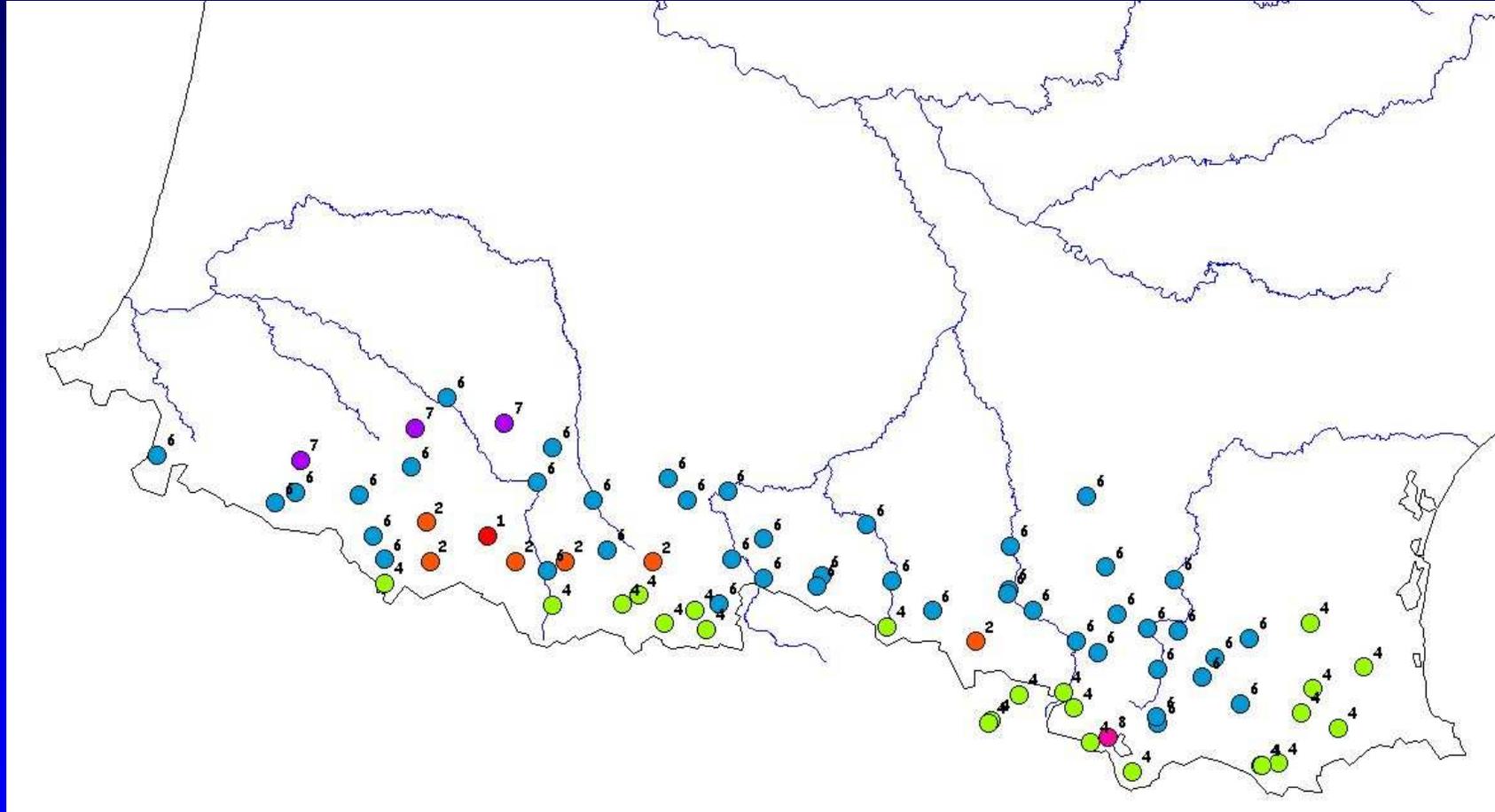
Cohérence spatiale des types de temps



1.5 Approches basées sur les pluies

Cohérence spatiale des types de temps

Pyénées (EDF/DTG, 2008)



- | | | |
|----------------------------|------------------|-------------------------|
| ● 1 Onde atlantique | ● 4 Sud | ● 7 Dépression centrale |
| ● 2 Océanique stationnaire | ● 5 Nord-Est | ● 8 Anticyclone |
| ● 3 Sud-Ouest | ● 6 Retour d'Est | |

1.5 Approches basées sur les pluies

Validation régionale de l'approche par type de temps saison

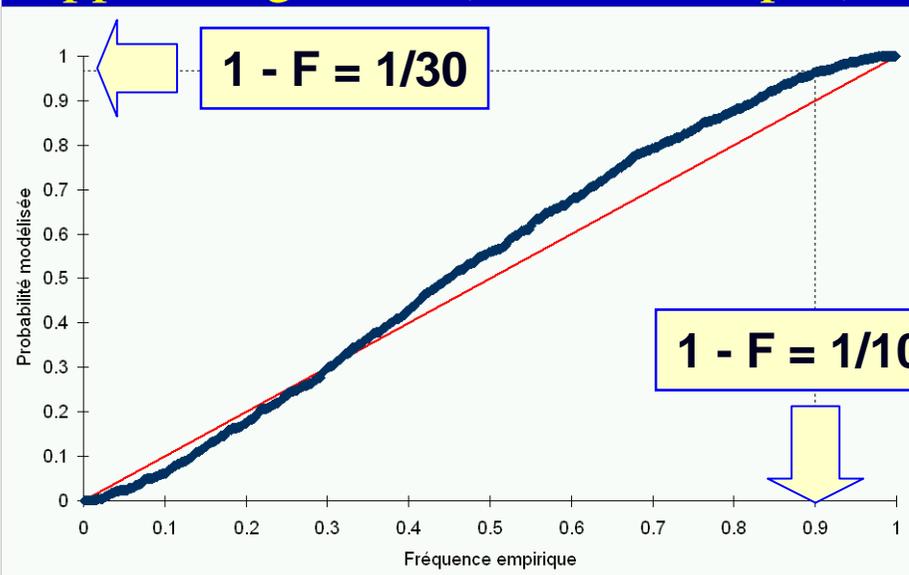
Pour 411 séries de 50 ans, partagées en 2 sous-séries de 25 ans, on s'intéresse à :

$\text{Prob}_{\text{th}}(X < \text{Max s/série 2})$ avec Prob_{th} ajustée sur sous-série 1

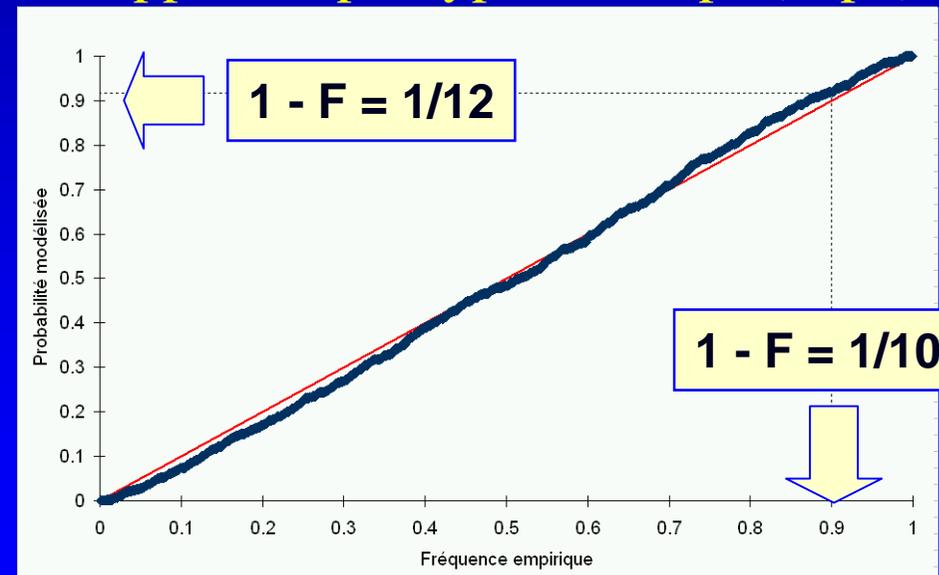
$\text{Prob}_{\text{th}}(X < \text{Max s/série 1})$ avec Prob_{th} ajustée sur sous-série 2

→ 2 x 411 estimation de Prob_{th}

Approche globale (somme d'expos)



Approche par type de temps (expo)



Une fois sur 10, on a observé, dans un échantillon de 25 ans, une pluie qu'on estimait ne devoir rencontrer qu'une fois sur 30, ou moins

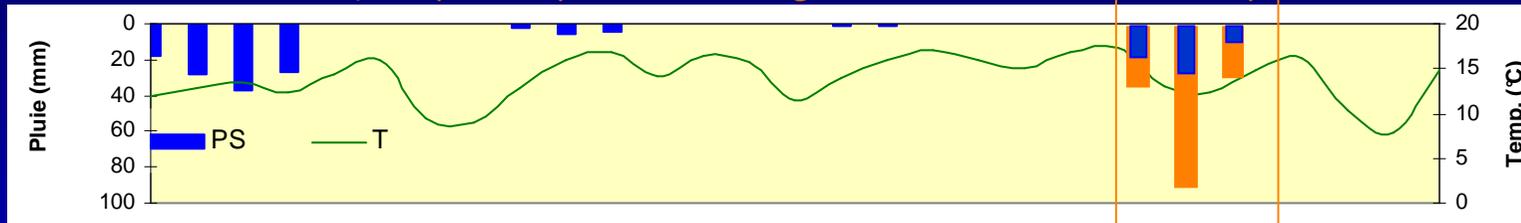
⇒ Forte réduction du biais d'estimation

1.5 Approches basées sur les pluies

2. Procédure de simulation hydrologique

Couplage d'un générateur d'averses et d'un modèle hydrologique

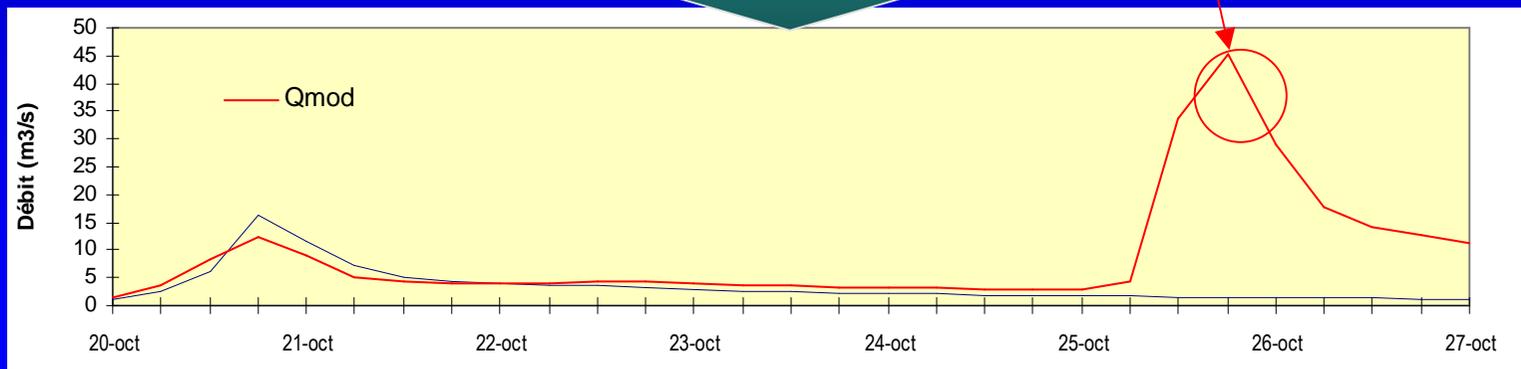
Pour chaque épisode pluvieux : tirage aléatoire d'une averse (pluie centrale et adjacentes)



Simulation

MORDOR

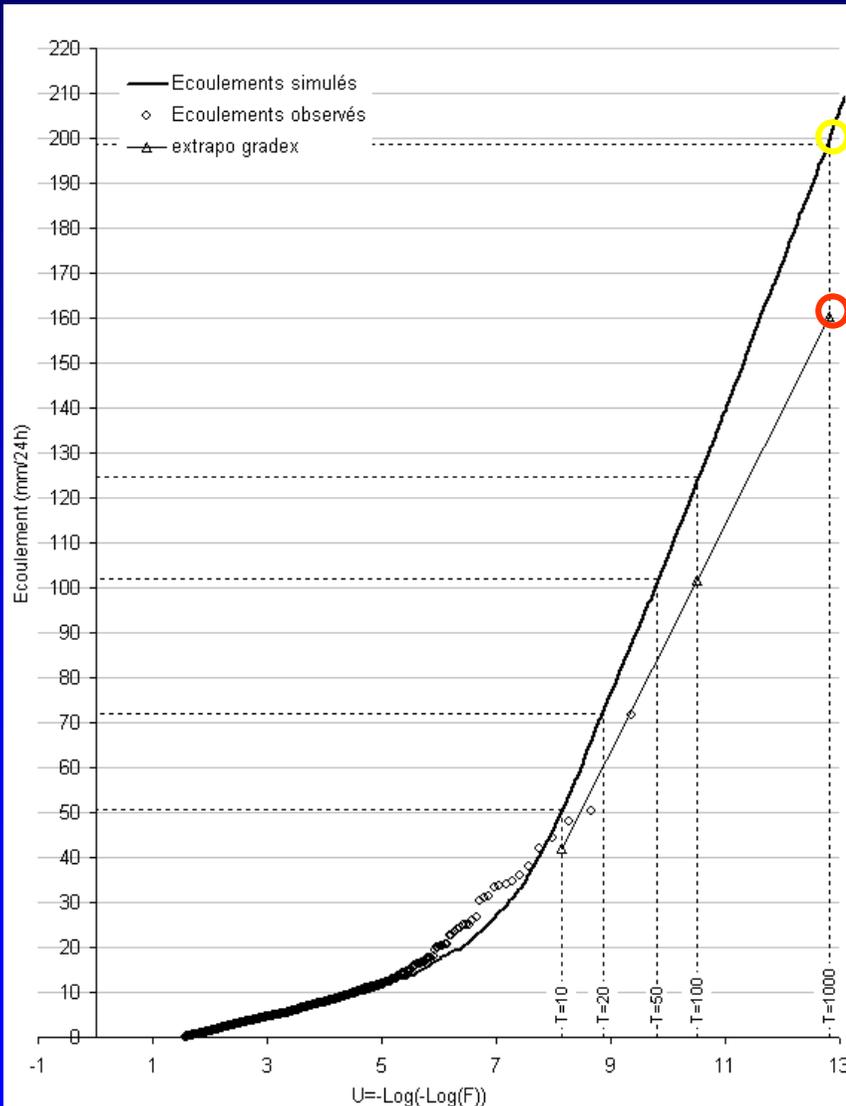
Ecoulement associé à l'averse



1.5 Approches basées sur les pluies

3. Estimation de la pointe de crue

Exemple de bassin méditerranéen (400 km²)



SCHADEX

$Q_{1000}=849\text{m}^3/\text{s}$

GRADEX

$Q_{1000}=685\text{m}^3/\text{s}$

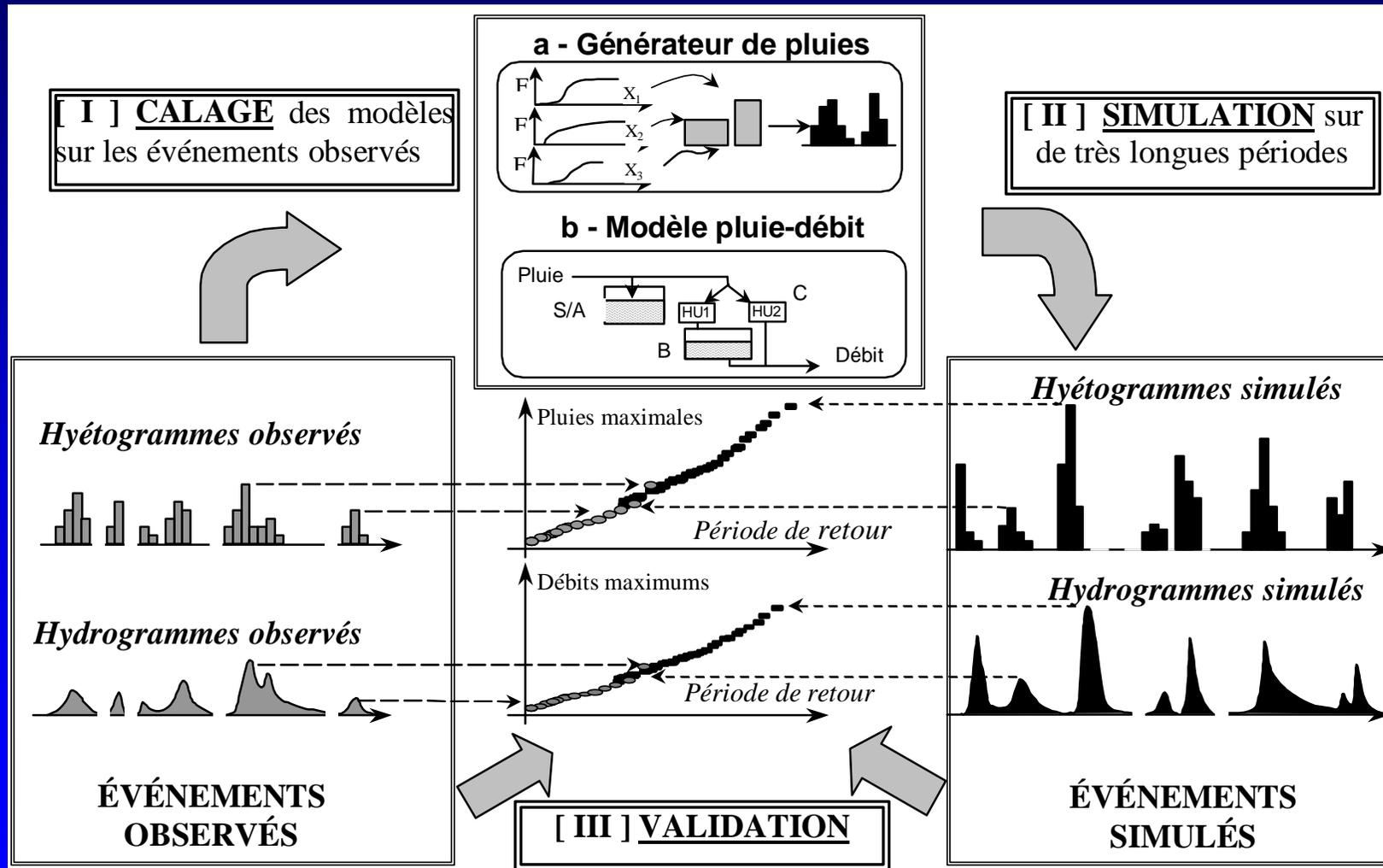
T	P+	Esim	Q24h	Qgradex
10	152	50.8	217	180
20	178	72.1	308	0
50	211	102.1	436	0
100	237	124.6	532	436
1000	322	198.8	849	685
10000	408	268.3	1146	935

Sur cet exemple, ré-évaluation +25 %
(aléa pluviométrique plus fort)

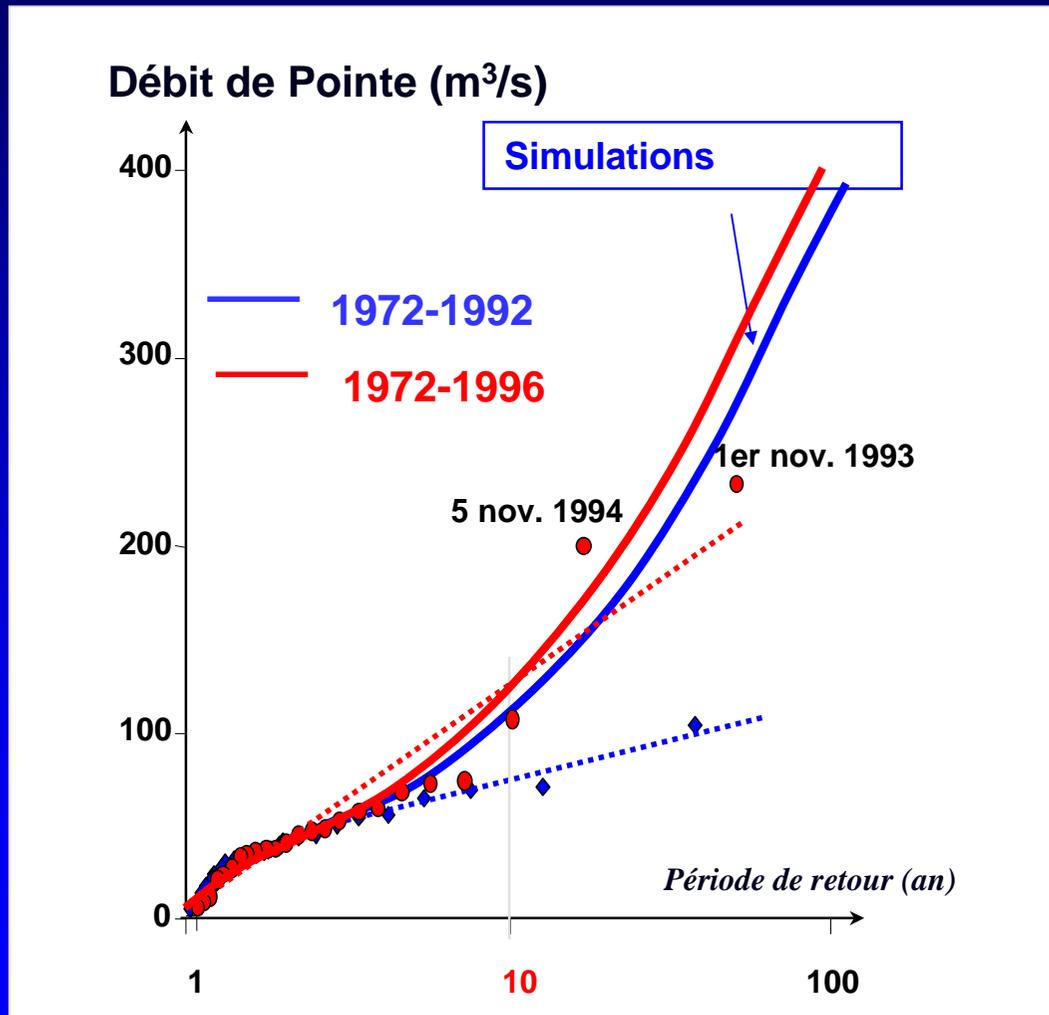
1.5 Approches basées sur les pluies

Principes de la méthode Shypre

(Cernesson, 1993; Arnaud, 1997 : Cemagref Aix)



Application de la méthode Shypre Bassin du Bevinco (Corse)



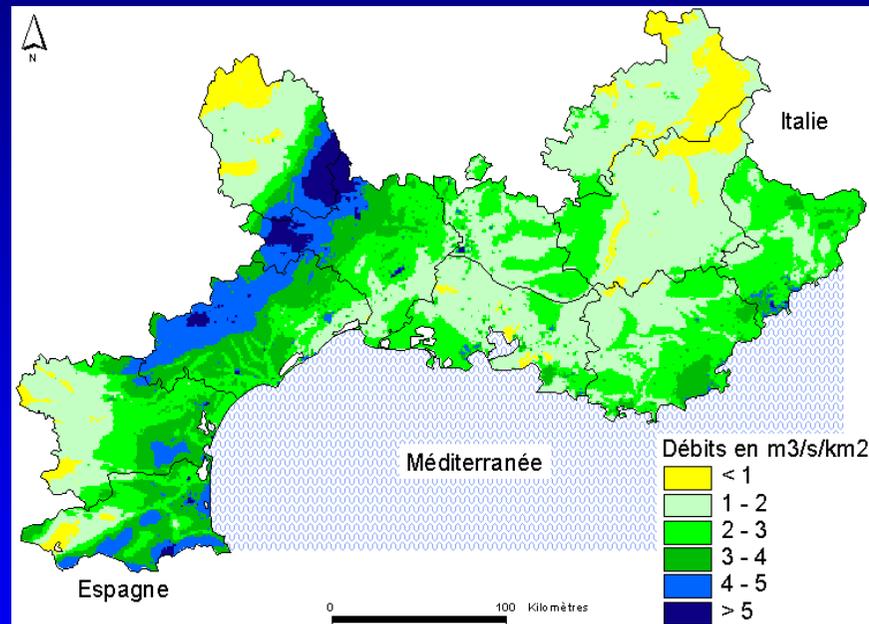
Sur cet exemple :

- robustesse de l'estimation des quantiles « Shypre » à la présence de valeurs singulières (cf. crues de 1993 et 1994)
- forte variabilité d'estimation par l'approche fréquentielle « classique » sur les débits

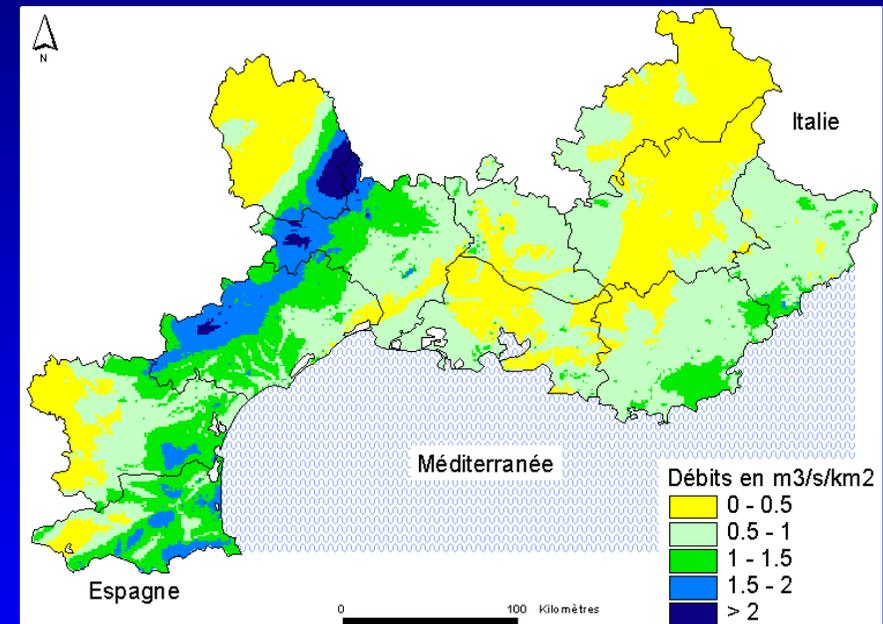
1.5 Approches basées sur les pluies

Modèle Shyreg (Lavabre *et al.*, 2003)

⇒ basé sur la régionalisation des paramètres du simulateur de pluies Shypre et d'un modèle pluie-débit simplifié (modèle SCS)



Débit de pointe



Débit journalier

Cartographie de la crue décennale en zone méditerranéenne

Bilan sur l'estimation des crues de référence

- **Diversité des méthodes d'estimation**

Pas de consensus à l'échelle internationale

- **Difficulté d'une réelle validation pour les crues extrêmes**

Par définition peu de crues exceptionnelles

- **Importance de l'étude des pluies**

Le comportement asymptotique des pluies commande celui des débits

⇒ **Recommandations**

➤ Comparer systématiquement plusieurs approches

➤ Evaluer les incertitudes sur les estimations

➤ Utiliser une information hydrologique la plus complète possible :

Hydrogrammes de crue / Analyse régionale /

Information historique / Information pluviométrique /

Approche géomorphologique / Paléocrues

Besoin d'informations complémentaires pour conforter l'estimation des crues extrêmes

- **Augmenter la taille de l'échantillon**

⇒ **agglomérer les observations de crue à l'échelle régionale**

⊗ Sensibilité : à la définition de la région
au mode de prise en compte de la dépendance spatiale

⇒ **reconstituer des événements antérieurs aux séries récentes**
(analyse documentaire, recherche de traces sédimentaires)

⊗ Sensibilité : à la reconstitution des débits anciens
à la variabilité climatique sur quelques siècles
+ dépendance à la disponibilité d'archives

- **Conditionner l'extrapolation à partir des pluies**

⊗ Sensibilité : à la distribution des pluies fortes
à la transformation pluie-débit

Exemple de groupes nationaux étrangers

(Royaume-Uni, Suisse)

- ✓ Rédaction d'un guide méthodologique sur les méthodes d'estimation
- ✓ Intercomparaison de méthodes pour préciser leur domaine d'application
- ✓ Cartographie de quantiles de référence
- ✓ Procédure d'estimation adaptée aux enjeux et la qualification de l'hydrologue
- ✓ Mise à disposition de données hydrologiques et production de logiciels pour des études complémentaires détaillées

2 Quelques pistes pour l'intercomparaison de méthodes

Projet ExtraFlo (ANR, RiskNat, 2008)

Prédétermination des valeurs extrêmes de pluie et de débit

1. Constitution de jeux de données test

Longues séries/ Jeux régionaux

Données naturalistes / Episodes remarquables

2. Intercomparaison et validation

Stratégie d'intercomparaison

Estimation en site mesuré / peu ou pas mesuré

3. Diagnostic sur les domaines d'application

Incertitudes

Application en contexte non stationnaire

Pistes de recherche

4. Mise à disposition d'outils de prédétermination

Guide pratique

Logiciels / SIG

Reconstitution de longues séries de pluie

Partenaires

✓ Cemagref

✓ Météo-France

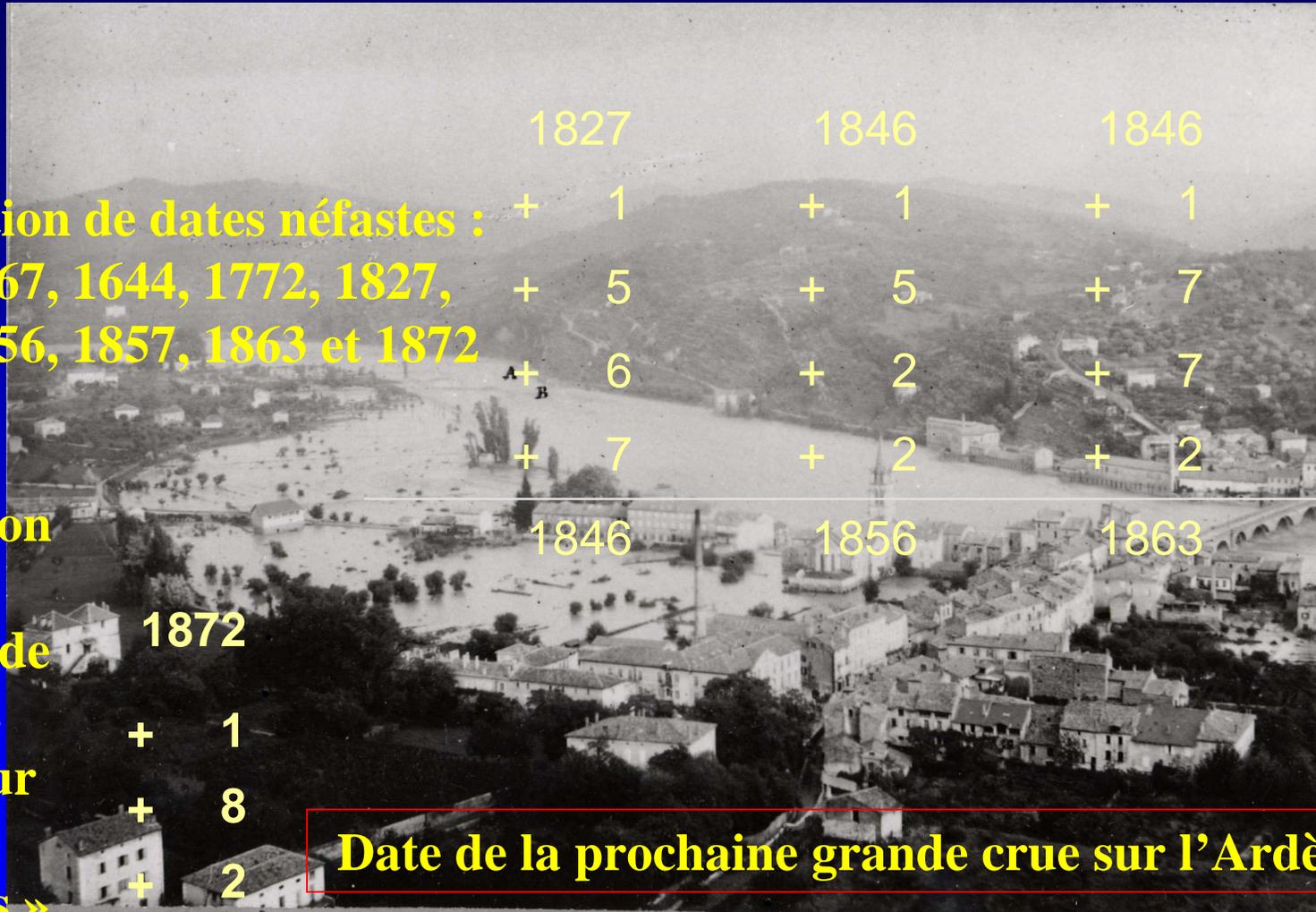
✓ HydroSciences Montpellier

✓ EdF

✓ GéoSciences Montpellier

Prévision de la crue de 1890

- Collection de dates néfastes : 1522, 1567, 1644, 1772, 1827, 1846, 1856, 1857, 1863 et 1872



Prédiction de Vaschalde « Mes notes sur le Vivarais »

Date de la prochaine grande crue sur l'Ardèche ?