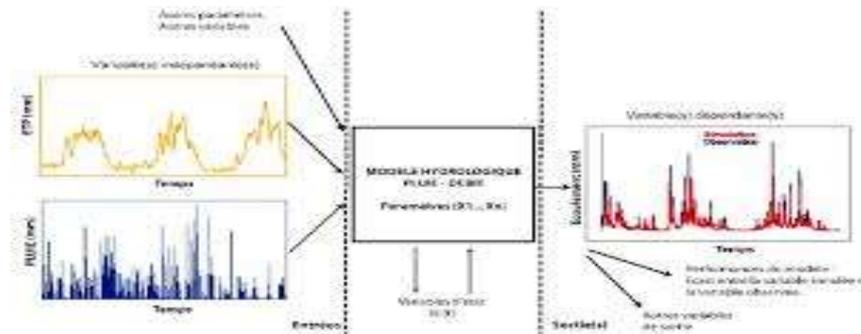


Modélisation hydrologique

M1 HU

Pr BABA HAMED K.

2023 - 2024



Modélisation hydrologique

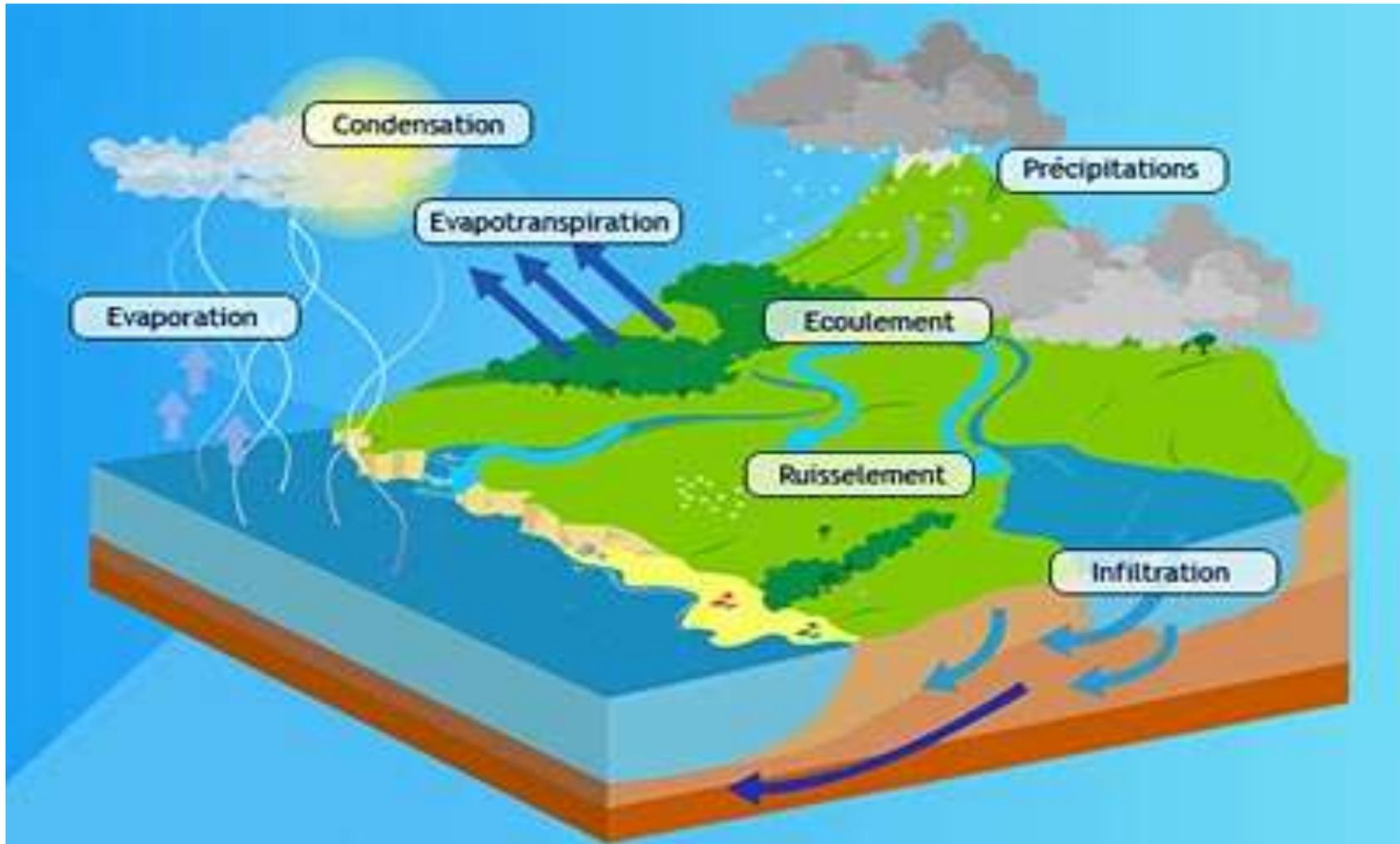


Les modèles hydrologiques sont des descriptions mathématiques simplifiées des processus gouvernant le cycle de l'eau dans un bassin versant.

Il s'agit d'une transformation qui, à partir de la connaissance de la pluie et éventuellement d'autres variables climatiques telles que l'évapotranspiration potentielle et la température, permet de reproduire la réponse d'un bassin versant en terme de débit.

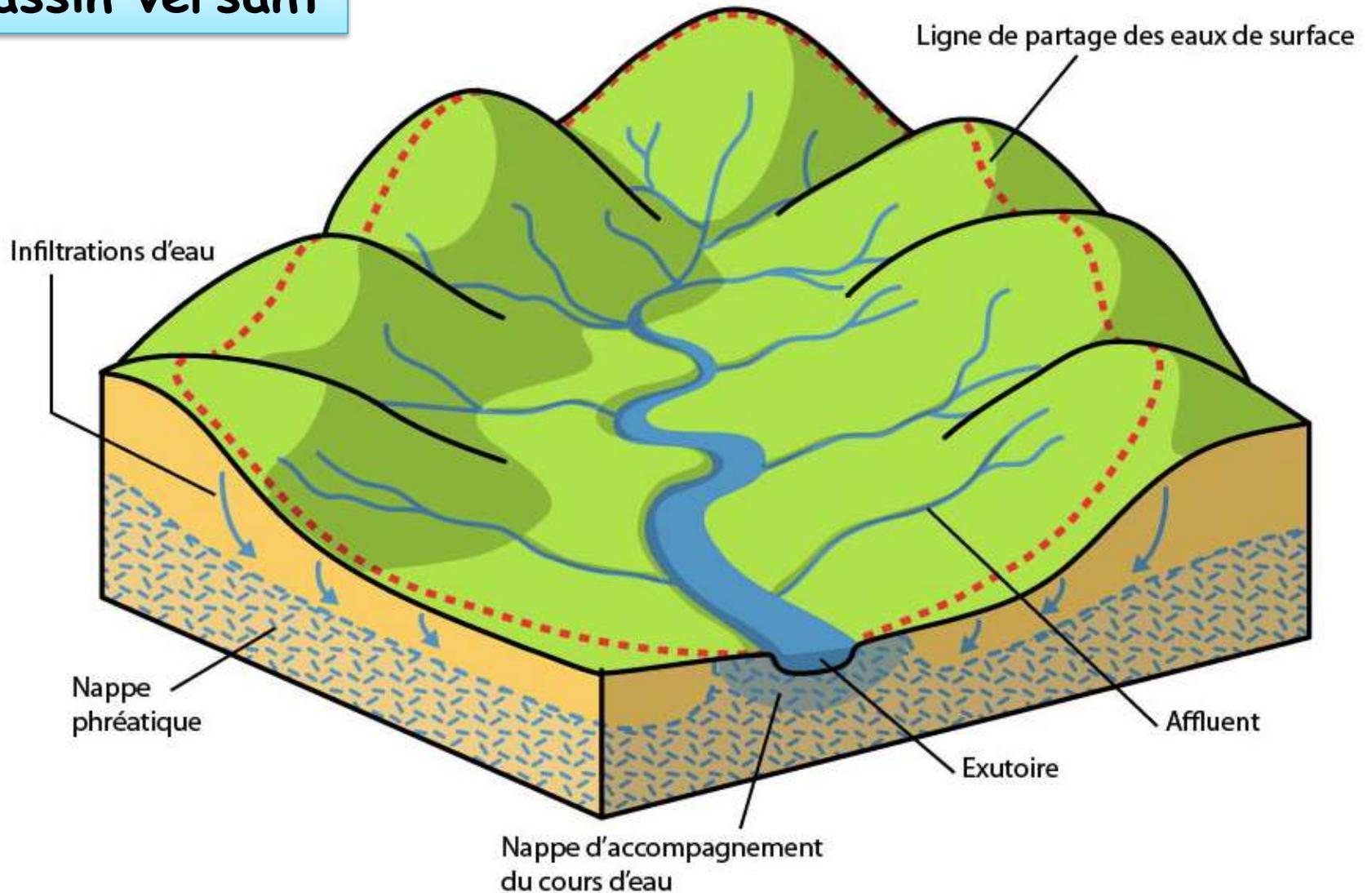
Modélisation hydrologique

Cycle de l'eau



Modélisation hydrologique

Bassin versant



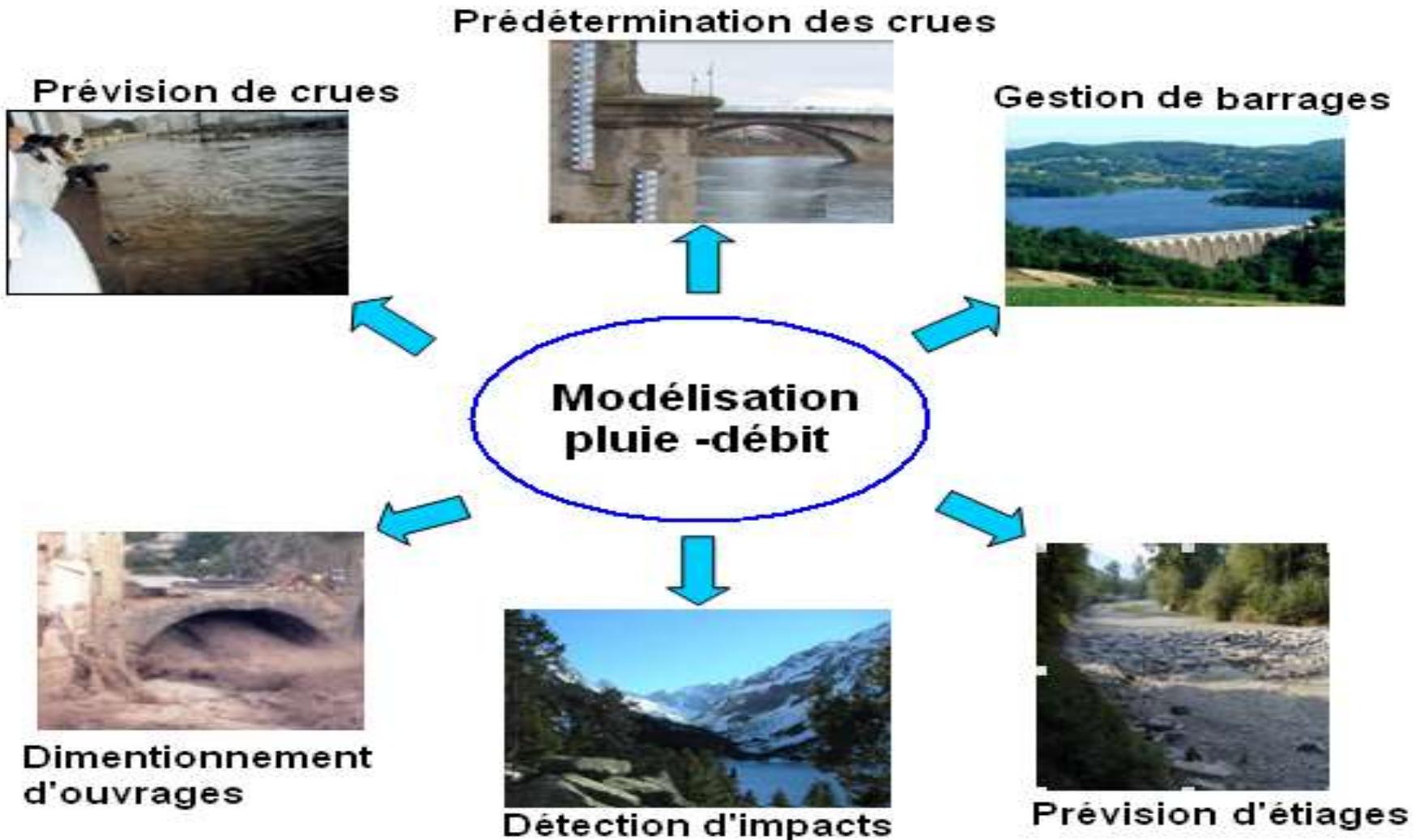
Modélisation hydrologique



Applications

- Gestion des ressources en eaux,
- Prédiction des crues (inondations) et d'étiages (sécheresse),
- Etude d'impact des phénomènes naturels et des aménagements,
- Modification d'occupation du sol et de la couverture végétale,
- Reconstitution des séries hydrologiques et la prédiction sur des sites non jaugés,
- Conception d'ouvrages hydrauliques.

Que peut-on attendre d'un modèle hydrologique



Modélisation hydrologique

Applications



Crue d'Oued M'zi (Laghouat, 30/09/2016)

Modélisation hydrologique

Applications



Terrain victime de la sécheresse

C'est quoi un modèle ?



Un modèle est une représentation simplifiée, sous forme physique ou mathématique, d'un système complexe dans lequel les réponses produites par des sollicitations externes sont difficilement prévisibles à cause du très grand nombre de facteurs en jeu.

• **Forme physique** : les relations entre le modèle et la réalité représentée sont du type figuratif (modèles réduits, photographies, croquis etc.) ou symbolique (carte géographique, géologique, pédologique, etc.).

• **Forme mathématique** : le système est représenté par une expression analytique.

C'est quoi un modèle ?



D'après Karplus (1983), un modèle mathématique est :

« un ensemble d'équations caractérisant un système réel, appelé prototype, de telle sorte qu'au moins un certain nombre de liens entre des sollicitations externes et des réponses correspondantes soient représentés de façon adéquate ».



C'est quoi un modèle ?

Le schéma illustre un système physique, dans lequel:

- (E): les sollicitations auxquelles il est soumis,
- (S): l'image du système (figurés, symboles ou équations),
- (R): la réponse du système.

Ex : (E) : Précipitations sur un bassin versant,
(S) : Modèle réduit, formule rationnelle du bassin versant,
(R) : débit correspondant représenté par un hydrogramme.



Systeme physique

C'est quoi un modèle ?



• La performance d'un modèle mathématique est sa capacité de prédire un de ces trois éléments.

L'hydrologue doit cependant faire face à trois problèmes de:

- **Analyse**, lorsque E et S sont connues et qu'on cherche la réponse R ,
- **Synthèse**, quand il s'agit de trouver l'image du système S en connaissant la sollicitation E et la réponse R ,
- **Contrôle** ou de **vérification**, lorsque l'image du système S et la réponse R sont utilisées pour évaluer la sollicitation E .

C'est quoi un modèle ?



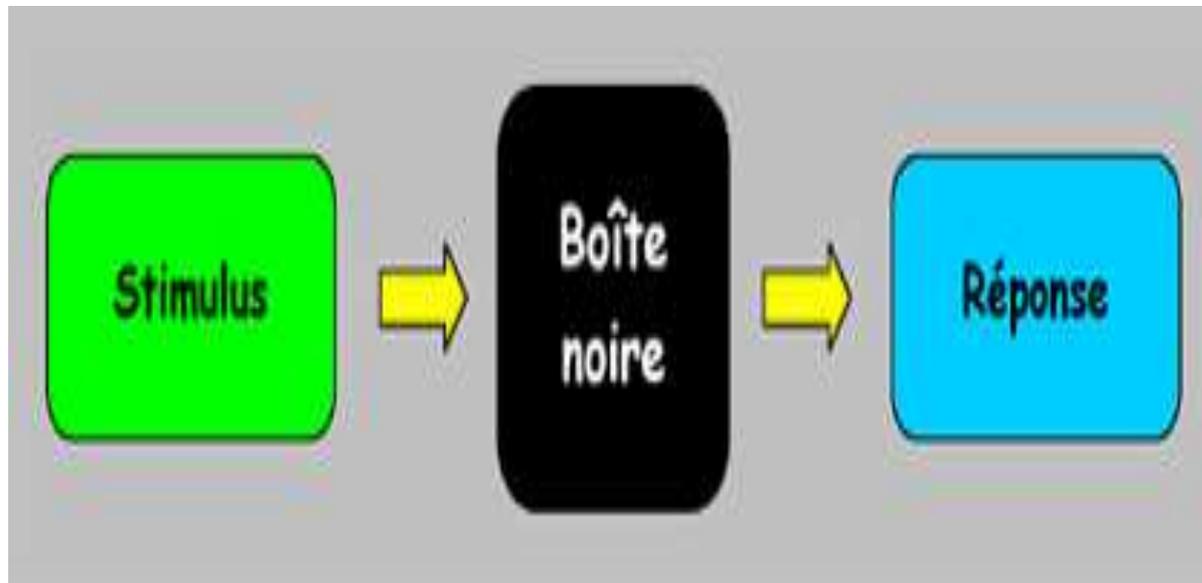
- Lorsque **E** et **R** sont **connues** et qu'on **ignore** complètement les caractéristiques de **S**, ce modèle porte le nom de " **boîte noire** ".
- Au contraire, lorsque l'image du système **S** est **connue** totalement par les lois qui définissent sa structure et par les liens entre ses composantes internes, il s'agit du modèle " **boîte blanche** ".



C'est quoi un modèle ?



Une **boîte noire**, ou **boîte opaque**, est la représentation d'un système sans considérer son fonctionnement interne.



C'est quoi un modèle ?



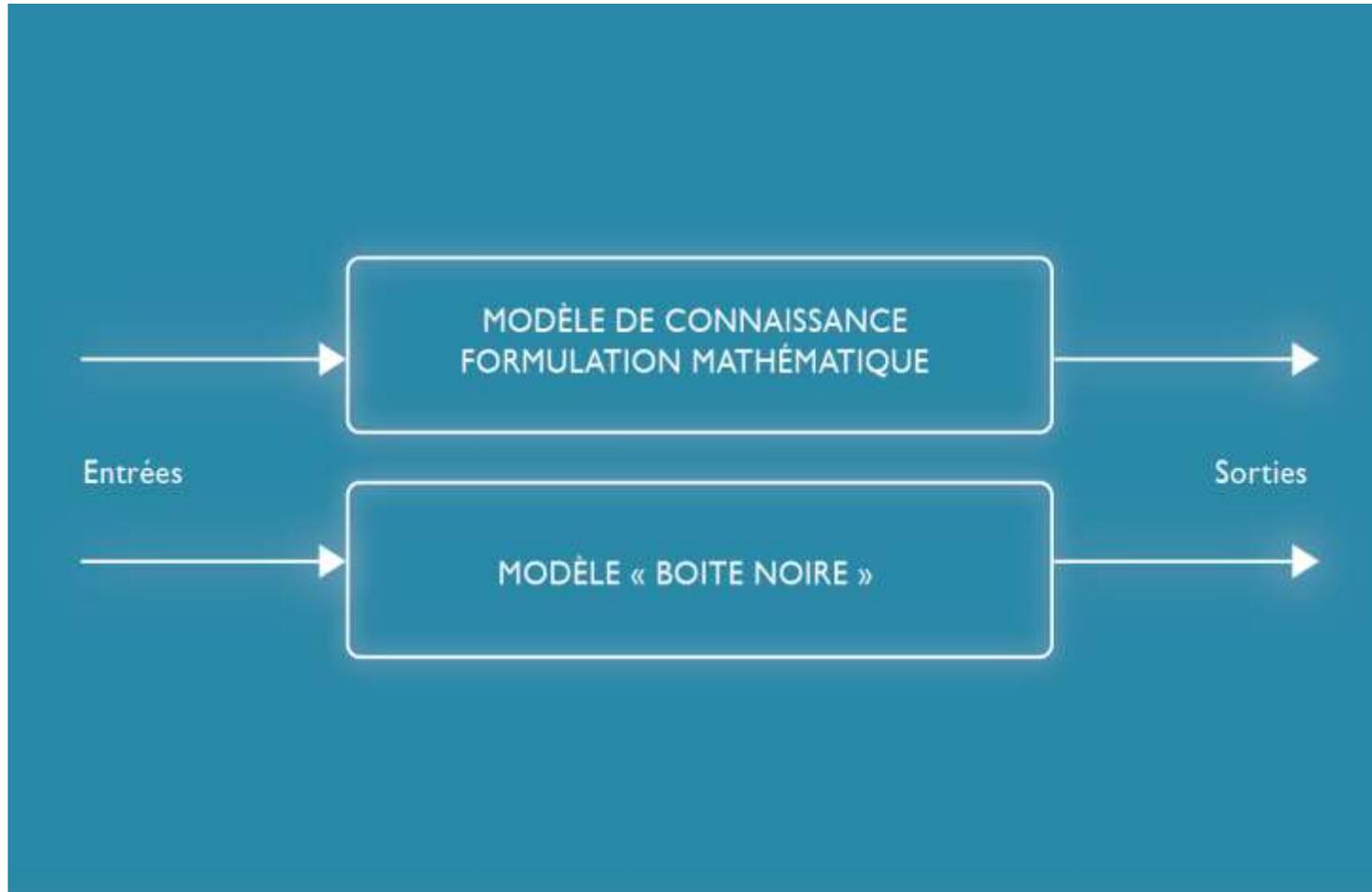
Les entrées et les sorties sont représentées, mais ce qui fait le lien entre les deux est « masqué par la boîte noire ».



C'est quoi un modèle ?



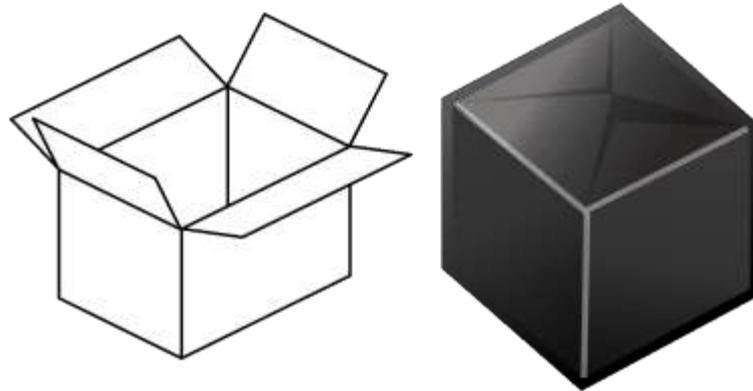
Exemple



C'est quoi un modèle ?



Le contraire d'une boîte noire, dit boîte blanche, est un système dont les mécanismes sont **visibles** et permettent d'en **comprendre le fonctionnement**.



C'est quoi un modèle ?



Un modèle mathématique peut être élaboré de façon inductive, déductive ou par la combinaison des deux:

La méthode inductive: s'appuie uniquement sur l'information obtenue par des données **expérimentales** des sollicitations E et des réponses R .

Or, bien que la connaissance de E et de S , mène en général à une solution unique de R , dans le cas contraire, le calcul de E conduit presque toujours à un nombre infini de solutions.

Ex : pour un débit donné et des conditions fixes du bassin, le nombre d'averses pouvant produire ce débit est infini.



C'est quoi un modèle ?



Un modèle mathématique peut être élaboré de façon inductive, déductive ou par la combinaison des deux:

La méthode déductive : là, on porte un jugement, sur le système physique en essayant de connaître le comportement de ses éléments constitutifs et leurs relations internes. Puis on établit analytiquement les équations mathématiques, et on utilise les données expérimentales simplement à titre de vérification pour remplir quelques lacunes ou évaluer certains coefficients.



Certains auteurs appellent les modèles mathématiques de type inductif pur (boîte noires) les modèles stochastiques, en opposition aux modèles à dominance déductive (boîte blanche) appelés modèles déterministes.

Elaboration d'un modèle mathématique

Son élaboration fait appel à des concepts fondamentaux :

- **Les lois:** ce sont les principes de base utilisés pour construire les équations relatives à l'image du système, (l'équation de continuité, le principe de conservation de la masse et de l'énergie).
- **La structure:** constituée du nombre, du type et de la nature des éléments constitutifs, ainsi que leur interaction. L'analyse de la structure permet de définir le nombre et le type d'équations qui vont représenter le système.
- **Les variables:** il s'agit des éléments constitutifs du modèle, qui peuvent être externes, indépendantes ou internes. Les variables externes peuvent être contrôlables (ex : débit d'exploitation d'un barrage) ou incontrôlables (ex : précipitations, l'infiltration, etc).
- **Les paramètres:** ce sont les quantités constantes qui influencent les variables internes.

Etapes d'élaboration d'un modèle mathématique

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles:

• **Définir** le modèle et ses objectifs en termes de précision. Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.

• **Identifier** le modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure, définir l'événement, les variables et les paramètres et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.



Etapes d'élaboration d'un modèle mathématique

- **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même (De Marsily et Ambroise, 1998).
- **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties.



Etapes d'élaboration d'un modèle mathématique

Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon :

- **la méthode passive**: on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des Méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations,

- **la méthode active**: en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations).

Le calage peut être manuel ou automatique.

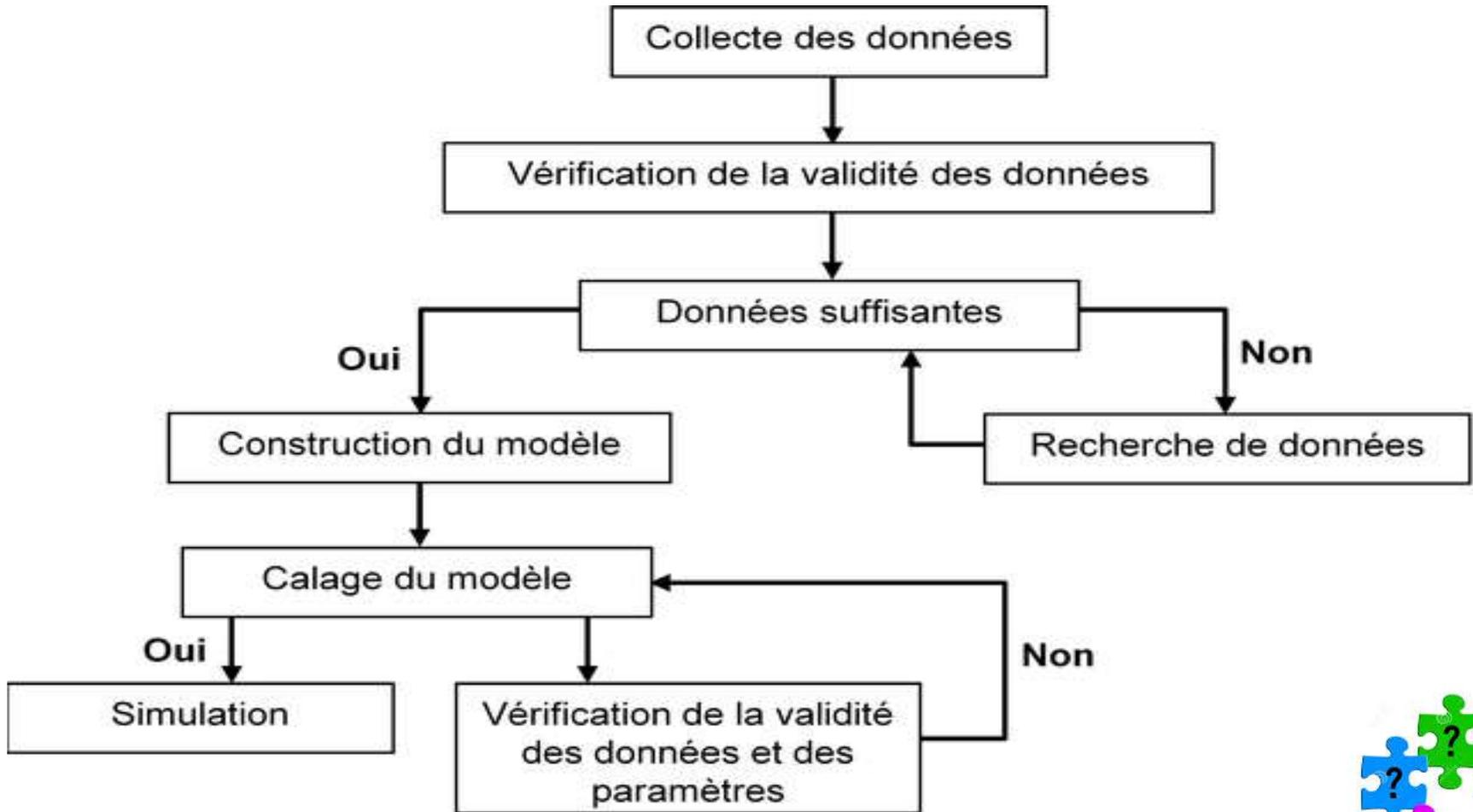


Etapes d'élaboration d'un modèle mathématique

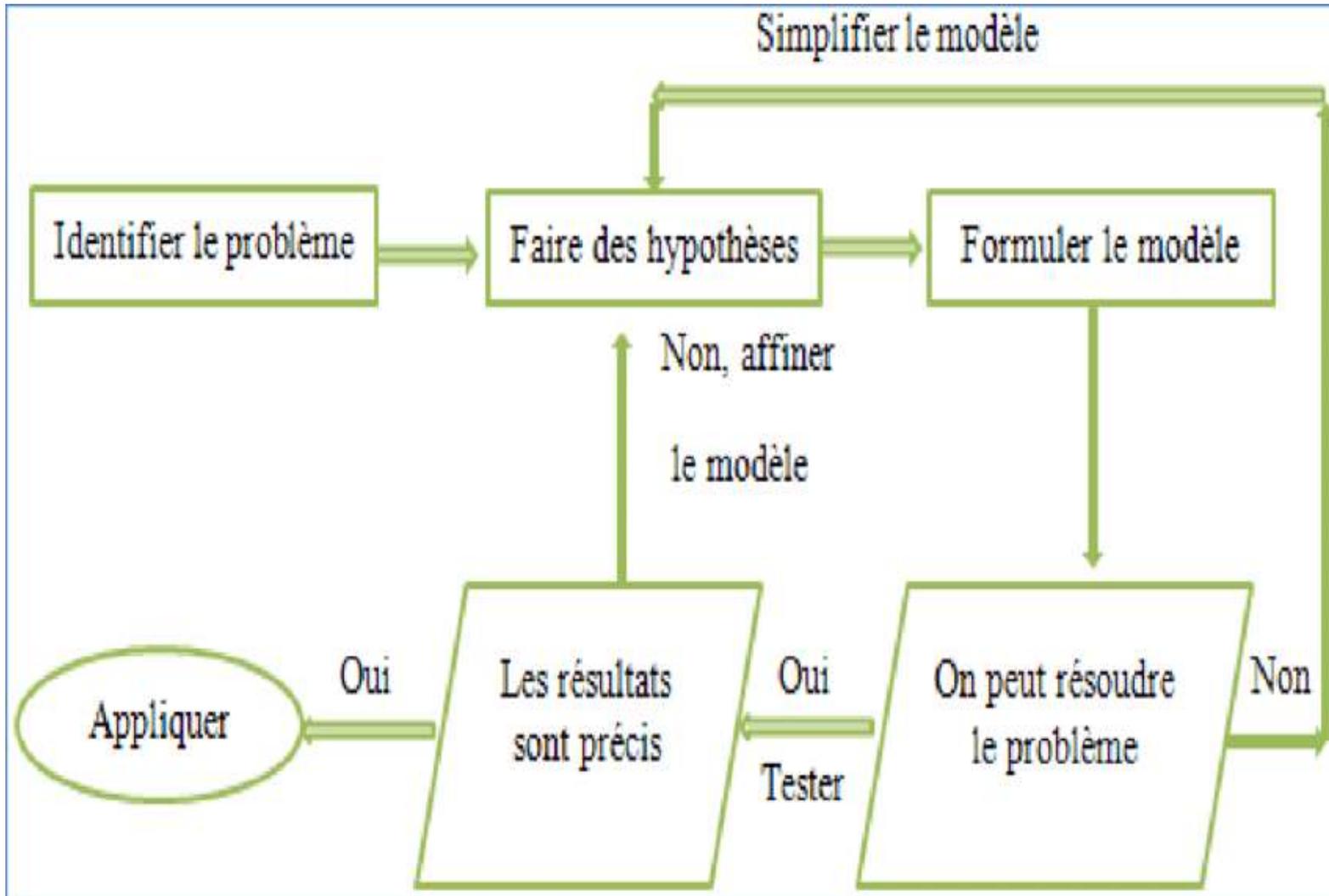
- **Evaluer** le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celles utilisées pour le calage.
- **Définir** le domaine de validité du modèle élaboré. La formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et conditions aux limites.



Étapes d'élaboration d'un modèle mathématique



Etapes d'élaboration d'un modèle mathématique



Variables et paramètres



Dans chaque modèle, On distingue quatre types de variables qui peuvent se trouver en totalité ou en partie dans chaque modèle:

Variables d'entrée : il s'agit des entrées du modèle, qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamiques du milieu, ...),

Variables de sortie: le modèle répond par un ensemble de variables qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques, etc.

Variables et paramètres

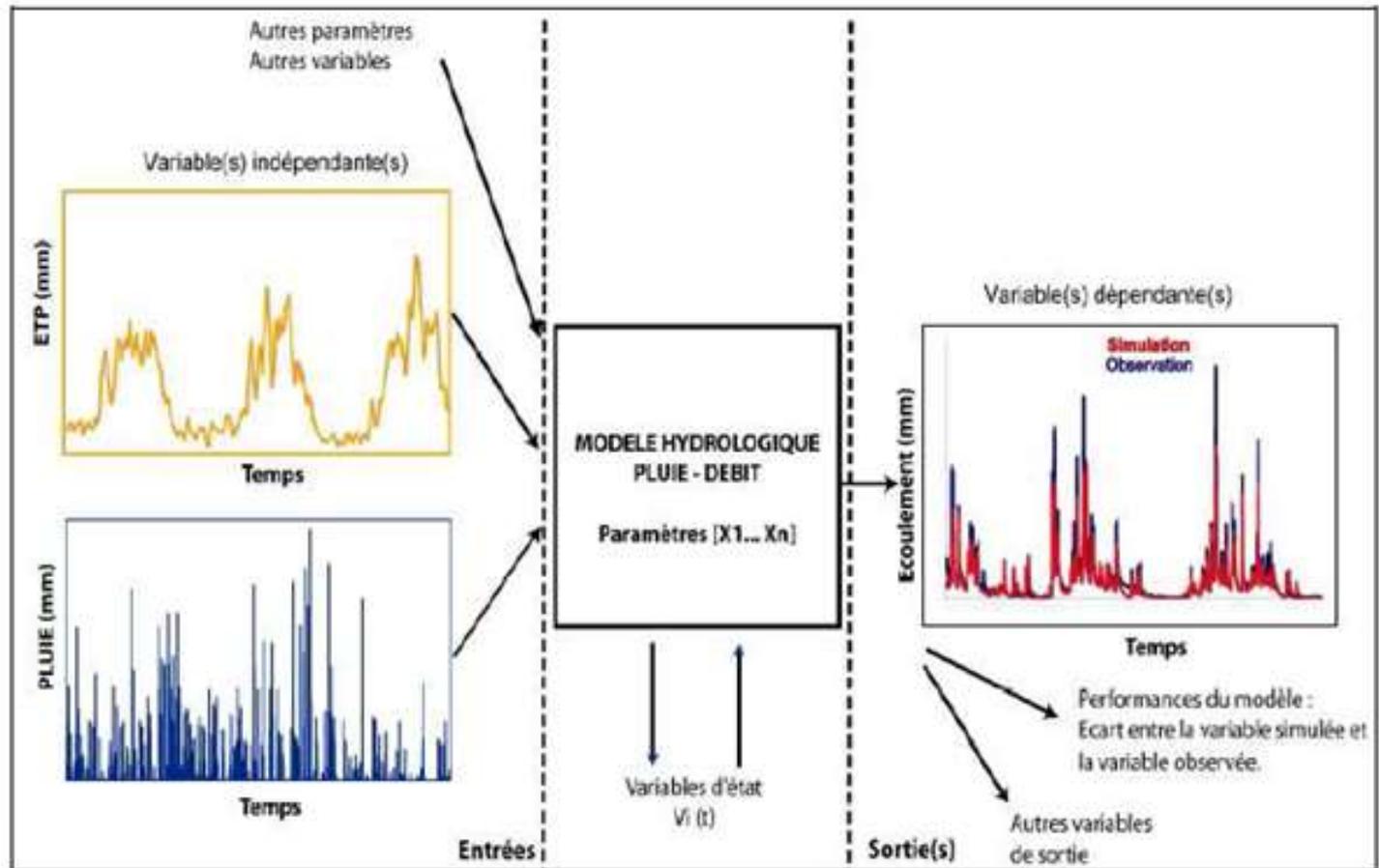


Variables d'état: il s'agit des **variables internes** au système, elles permettant de caractériser l'**état** du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps. Précisément, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs, taux de saturation des sols, profondeur des sols, pentes, ...),

Paramètres: servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié, et fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par **calage**.



Représentation du fonctionnement d'un modèle



Variables et paramètres



Les variables cités ci-dessus contribuent dans la modélisation hydrologique par l'intermédiaire de deux fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert



Fonctions du modèle



• **La fonction de production** : c'est une représentation simple mais réaliste, elle assure la **transformation** de la **pluie brute** en **pluie nette** en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue), elle est celle qui contribue effectivement au ruissellement. En d'autres termes, la fonction de production permet de calculer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire d'un bassin ou sous-bassin versant.

• **La fonction de transfert** : Une fois la pluie participant au ruissellement calculée, c'est le rôle de la fonction de transfert de déterminer l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant de la pluie nette.

Fonctions du modèle



HYDROSYSTEME :
« Bassin versant »

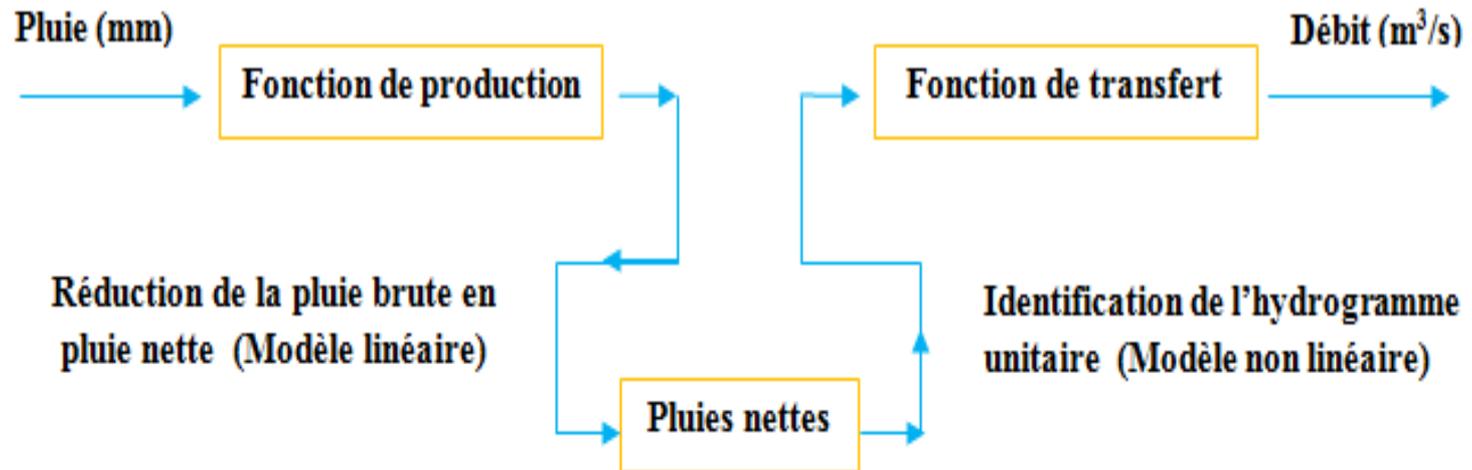


Schéma d'un modèle hydrologique

Choix d'un modèle



Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

Objectif de l'étude hydrologique

Disponibilité des données

Nature du modèle





Choix d'un modèle

- **Objectif de l'étude hydrologique**: les objectifs sont multiples selon lesquels on peut négliger ou simplifier certains paramètres dans la modélisation,
- **Disponibilité des données**: En dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d'autres, le manque de données nous contraint à les utiliser,
- **Nature du modèle**, la robustesse et la simplicité du modèle influencent le choix en particulier dans le cas où le temps et/ où le coût présentent une contrainte.





Typologie des modèles

L'ambiguïté des interactions entre les différents éléments du bilan hydrologique et la complexité des systèmes étudiés ont permis l'émergence d'un nombre indénombrable de modèles "***il y a presque autant de modèles que d'hydrologues***", Beaucoup d'auteurs ont abordé le sujet de la classification des modèles.

Selon Singh, 1995, un modèle est caractérisé par 5 éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties. Singh (1995) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classifications : modèle global ou distribué déterministe ou stochastique.

La méthode de résolution employée peut également différencier les modèles en empirique ou conceptuel



Typologie des modèles

Classification de Singh (1995)

Selon Singh, un modèle est caractérisé par 5 éléments constitutifs:

- la géométrie du système (bassin versant),
- les entrées dans le système,
- les lois de formalisation des processus,
- l'état initial et les conditions aux limites du système,
- les sorties.

Singh a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont:

- la description des processus,
- l'échelle spatio-temporelle,
- la méthode utilisée pour résoudre les équations.



Typologie des modèles

Classification de Singh (1995)

Selon la description des processus de Singh, on peut avoir plusieurs niveaux de classifications :

- **modèle global ou distribué,**
- **modèle déterministe ou stochastique.**

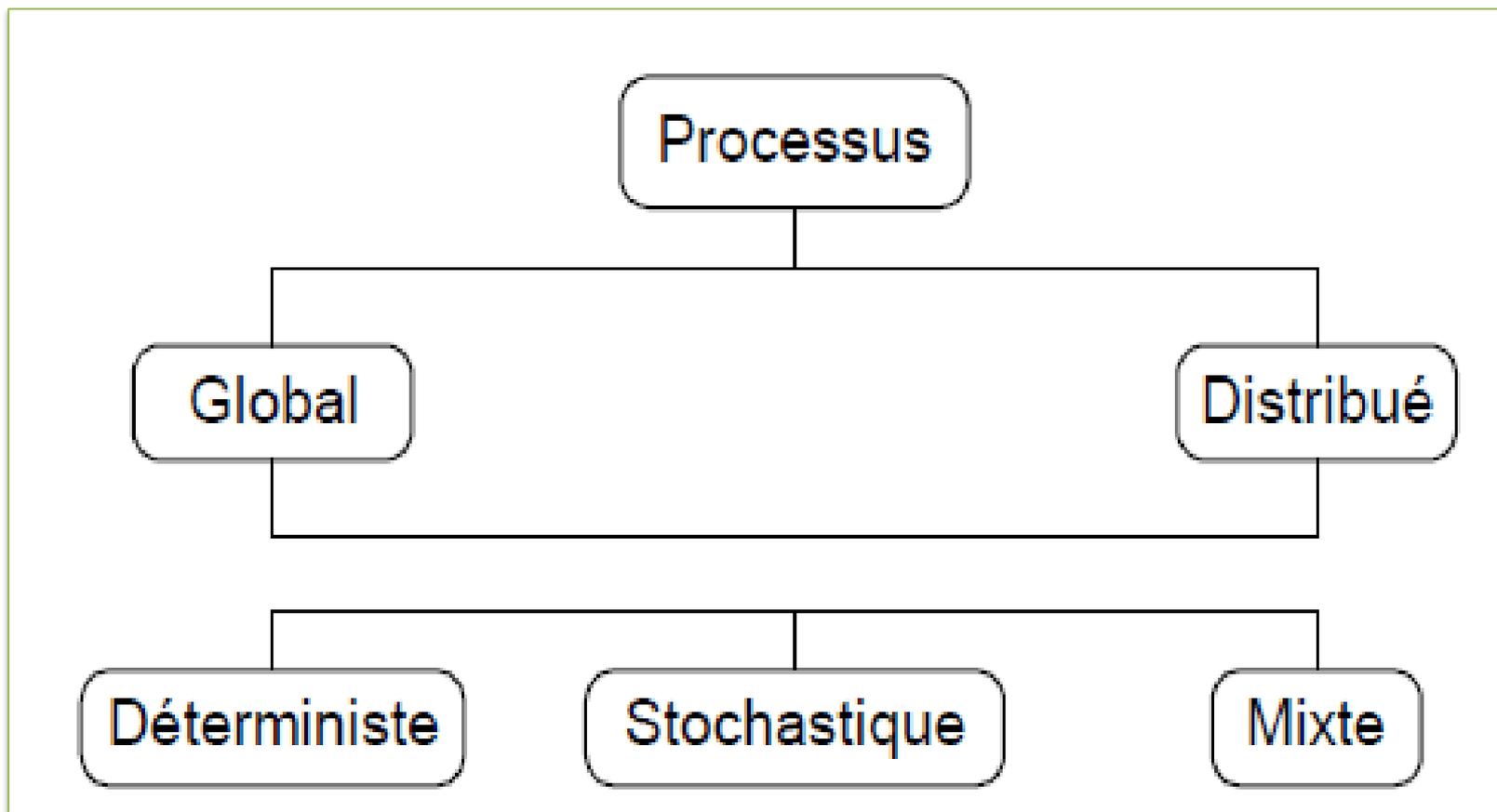
La méthode de résolution employée peut également différencier les modèles en:

- **empirique,**
- **conceptuel.**



Typologie des modèles

Classification de Singh (1995)

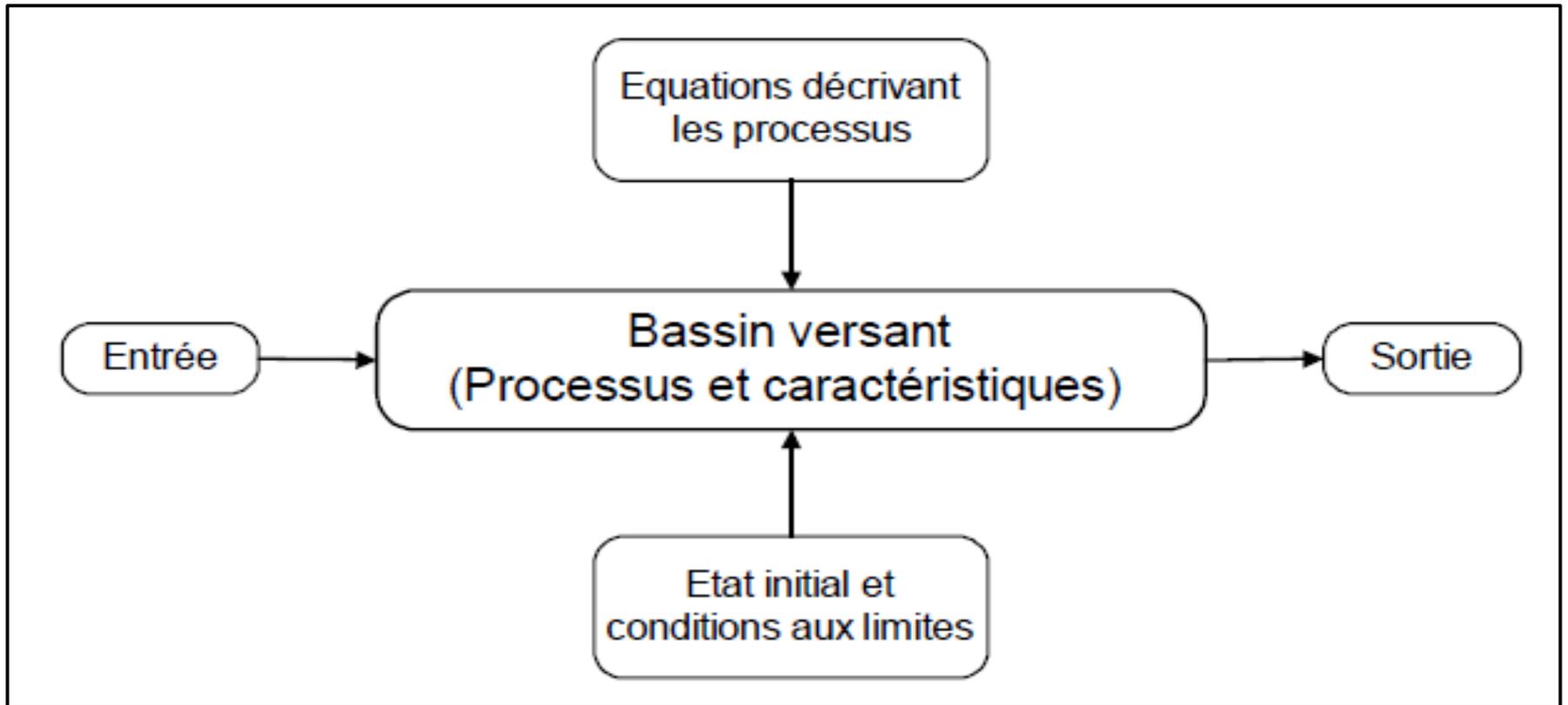


Composantes d'un modèle (d'après Singh, 1995).



Typologie des modèles

Classification de Singh (1995)



Classification des modèles (d'après Singh, 1995).



Typologie des modèles

Classification selon le degré d'abstraction

Modèles physiques : Dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie, ...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ils représentent le système à une échelle réduite.

Modèles mathématiques : Ils décrivent le processus hydrologique à l'aide des équations mathématiques qui relient les variables d'entrée et de sortie.



Typologie des modèles

Classification selon la nature des variables

Modèles déterministes : Dans lesquels la relation entre variables d'entrée et de sortie est phénoménologique et ne considère pas le caractère aléatoire de variable, la même entrée produit toujours la même sortie.

Modèles stochastiques (probabilistes) : Le terme stochastique est lié à la statistique et traduit le caractère aléatoire du modèle. Il permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.



Typologie des modèles

Classification selon la discrétisation spatiale

Modèles globaux : le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant (approche par bilan) qui est considéré comme entité homogène. On utilise dans ce type de modèles des valeurs représentatives moyennes.

Exemple: le modèle GR (génie rural) (IRSTEA). C'est un modèle à réservoirs, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J.

Modèles spatialisés (distribués) : Ils tiennent compte de la variabilité spatiale des processus et des variables d'entrée, ils sont plus avantageux que les modèles globaux.

Dans le cas où les composants du système ne sont pas complètement spatialisés, on parle de modèles semi spatialisés.



Typologie des modèles

Classification selon la description des sous processus

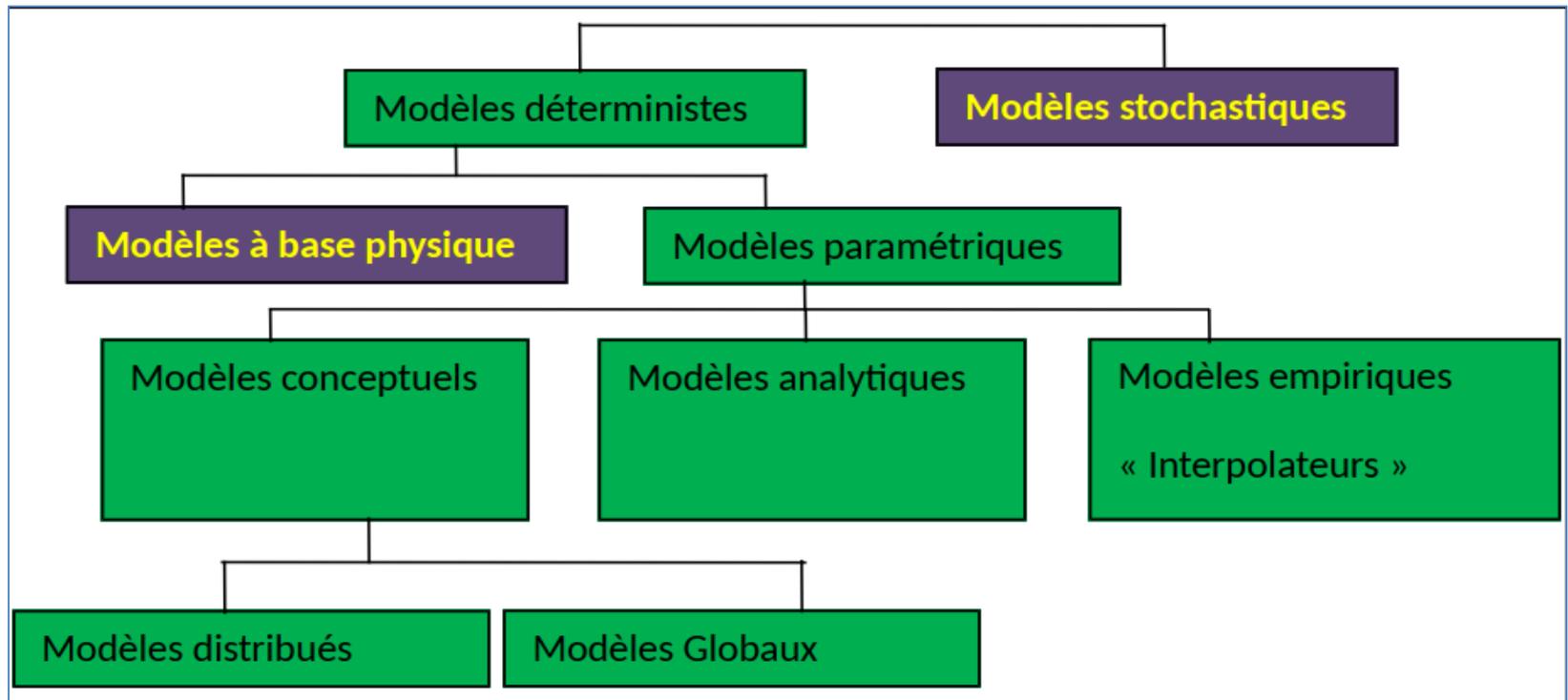
Modèles conceptuels : le modèle conceptuel considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et qui sont censés de représenter plusieurs niveaux de stockages, suivant une dimension verticale. Ce modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties.

Modèles empiriques : Ils sont utilisés pour reproduire le comportement global du système sans décrire les processus élémentaires. Ils sont généralement de type boîte noire sous la forme $\text{débit} = f(\text{pluie})$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits.



Typologie des modèles

Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit sont:



Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002).

Merci de votre attention

