

**ASSISTANCE AU CALAGE DE MODÈLES  
NUMÉRIQUES EN HYDRAULIQUE FLUVIALE  
—  
APPORTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

Jean-Philippe VIDAL

Thèse présentée pour obtenir le diplôme de docteur de  
l'Institut National Polytechnique de Toulouse



18 mars 2005

# Travaux interdisciplinaires

## Domaines

- hydraulique fluviale
- modélisation numérique
- intelligence artificielle

# Travaux interdisciplinaires

## Domaines

- hydraulique fluviale
- modélisation numérique
- intelligence artificielle

## Encadrement

Denis DARTUS



Sabine MOISAN



Jean-Baptiste FAURE



# Contexte

## Modéliser le fonctionnement des cours d'eau

### Modèle hydraulique

- Représentation numérique d'une rivière
- Études des modèles 1-D

# Contexte

## Modéliser le fonctionnement des cours d'eau

### Modèle hydraulique

- Représentation numérique d'une rivière
- Études des modèles 1-D

### Outil d'aide à la décision

- Détermination des zones inondables



Terrain riverains de la Lèze après le passage d'une crue.

# Contexte

## Modéliser le fonctionnement des cours d'eau

### Modèle hydraulique

- Représentation numérique d'une rivière
- Études des modèles 1-D

### Outil d'aide à la décision

- Détermination des zones inondables
- Étude de la propagation des crues



La Lèze en phase de décrue.

# Contexte

## Procédure de calage

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements **passés**, il parviendra à reproduire des événements **futurs** ou **hypothétiques**.*

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

- 1 Comparaison de crues **mesurées** et **simulées** par le modèle

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

- 1 Comparaison de crues mesurées et simulées par le modèle
- 2 Ajustement des **paramètres** du modèle : coefficients de résistance à l'écoulement

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

- 1 Comparaison de crues mesurées et simulées par le modèle
- 2 Ajustement des paramètres du modèle : coefficients de résistance à l'écoulement

Le calage dépend des **objectifs du modèle**

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

- 1 Comparaison de crues mesurées et simulées par le modèle
- 2 Ajustement des paramètres du modèle : coefficients de résistance à l'écoulement

### Le calage dépend des objectifs du modèle

- **Domaine d'application visé** : à quoi va servir le modèle ?

# Contexte

## Procédure de calage

### Hypothèse

*On suppose que si le modèle parvient à reproduire des événements passés, il parviendra à reproduire des événements futurs ou hypothétiques.*

### Calage de modèle en hydraulique fluviale

- 1 Comparaison de crues mesurées et simulées par le modèle
- 2 Ajustement des paramètres du modèle : coefficients de résistance à l'écoulement

### Le calage dépend des objectifs du modèle

- Domaine d'application visé : à quoi va servir le modèle ?
- **Niveau de correspondance attendu** : précision demandée sur la concordance entre observations et résultats de simulation

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts
- large diffusion des codes de calcul  $\implies$  calage incombe à des utilisateurs peu expérimentés

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts
- large diffusion des codes de calcul  $\implies$  calage incombe à des utilisateurs peu expérimentés

### Méthodes actuelles de calage

*Automatique*

*Heuristique*

---

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts
- large diffusion des codes de calcul  $\implies$  calage incombe à des utilisateurs peu expérimentés

### Méthodes actuelles de calage

*Automatique*

*Heuristique*

une fonction coût

un algorithme d'optimisation

un test d'arrêt

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts
- large diffusion des codes de calcul  $\implies$  calage incombe à des utilisateurs peu expérimentés

### Méthodes actuelles de calage

*Automatique*

*Heuristique*

une fonction coût

un expert

un algorithme d'optimisation

un test d'arrêt

# Motivation

## Calage de modèles hydrauliques

### Caractéristiques de la tâche

- complexe, maîtrisée seulement par des experts
- large diffusion des codes de calcul  $\implies$  calage incombe à des utilisateurs peu expérimentés

### Méthodes actuelles de calage

#### *Automatique*

une fonction coût

un algorithme d'optimisation

un test d'arrêt

#### *Heuristique*

un expert *avec des connaissances sur les procédures de calage, en hydraulique fluviale, sur le code de calcul et sur le site étudié*

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

- liés à la difficulté de mise en œuvre de l'expertise

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

- liés à la difficulté de mise en œuvre de l'expertise
- liés à l'optimisation mathématique
  - valeurs de paramètres irréalistes
  - équifinalité de jeux de paramètres

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

- liés à la difficulté de mise en œuvre de l'expertise
- liés à l'optimisation mathématique
  - valeurs de paramètres irréalistes
  - équifinalité de jeux de paramètres

### Produire un outil destiné à un utilisateur final

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

- liés à la difficulté de mise en œuvre de l'expertise
- liés à l'optimisation mathématique
  - valeurs de paramètres irréalistes
  - équifinalité de jeux de paramètres

### Produire un outil destiné à un utilisateur final

- **Formaliser** les connaissances mises en œuvre par l'expert pour **automatiser** le processus de calage

# Approche

## Objectifs

### Concilier les méthodes actuelles

Lever les problèmes :

- liés à la difficulté de mise en œuvre de l'expertise
- liés à l'optimisation mathématique
  - valeurs de paramètres irréalistes
  - équifinalité de jeux de paramètres

### Produire un outil destiné à un utilisateur final

- Formaliser les connaissances mises en œuvre par l'expert pour automatiser le processus de calage
- **Concevoir** et **développer** un système d'assistance au calage

# Approche

## Système d'assistance au calage

### Démarche

# Approche

## Système d'assistance au calage

### Démarche

- 1 Identification des connaissances

# Approche

## Système d'assistance au calage

### Démarche

- 1 Identification des connaissances
- 2 **Modélisation** des connaissances

# Approche

## Système d'assistance au calage

### Démarche

- 1 Identification des connaissances
- 2 Modélisation des connaissances
- 3 **Implémentation** opérationnelle d'un système à base de connaissances

# Approche

## Système d'assistance au calage

### Démarche

- 1 Identification des connaissances
- 2 Modélisation des connaissances
- 3 Implémentation opérationnelle d'un système à base de connaissances

### Outils d'intelligence artificielle

- langage de représentation de connaissances
- moteur d'inférence

# Plan de l'exposé

- 1 Modélisation des connaissances
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage
- 3 Mise en œuvre opérationnelle
- 4 Extensions du système
- 5 Conclusions et perspectives

# Plan

- 1 Modélisation des connaissances**
  - Quelles connaissances ?
  - Les concepts
  - Les procédures
  - Les raisonnements
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage
- 3 Mise en œuvre opérationnelle
- 4 Extensions du système
- 5 Conclusions et perspectives

# Quelles connaissances ?

# Quelles connaissances ?

## Différents types de connaissances

- des concepts : éléments manipulés
- des procédures : structure de la tâche
- des raisonnements : règles heuristiques

# Quelles connaissances ?

## Différents types de connaissances

- des **concepts** : éléments manipulés
- des **procédures** : structure de la tâche
- des **raisonnements** : règles heuristiques

# Quelles connaissances ?

## Différents types de connaissances

- des concepts : éléments manipulés
- des procédures : structure de la tâche
- des raisonnements : règles heuristiques

## Différents niveaux de connaissances

- ① génériques : calage de modèles numériques
- ② spécifiques au domaine : hydraulique fluviale 1-D
- ③ propres à l'utilisation du code de calcul : MAGE
- ④ sur le site étudié : mesures

# Les concepts

## Connaissances descriptives

### Définition

**Ontologie** : description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné.

# Les concepts

## Connaissances descriptives

### Définition

**Ontologie** : description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné.

### Ontologies développées

# Les concepts

## Connaissances descriptives

### Définition

**Ontologie** : description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné.

### Ontologies développées

- 1 **ONTOVAL** : concepts génériques manipulés lors de la comparaison d'un système avec son modèle numérique

# Les concepts

## Connaissances descriptives

### Définition

**Ontologie** : description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné.

### Ontologies développées

- 1 **ONTOVAL** : concepts génériques manipulés lors de la comparaison d'un système avec son modèle numérique
- 2 **ONTOHYD** : spécialisation des concepts et des relations de OntoVal dans le domaine de l'hydraulique fluviale 1-D

# Les concepts

## Connaissances descriptives

### Définition

**Ontologie** : description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné.

### Ontologies développées

- 1 ONTOVAL : concepts génériques manipulés lors de la comparaison d'un système avec son modèle numérique
- 2 ONTOHYD : spécialisation des concepts et des relations de OntoVal dans le domaine de l'hydraulique fluviale 1-D

### «Relativité de l'ontologie»

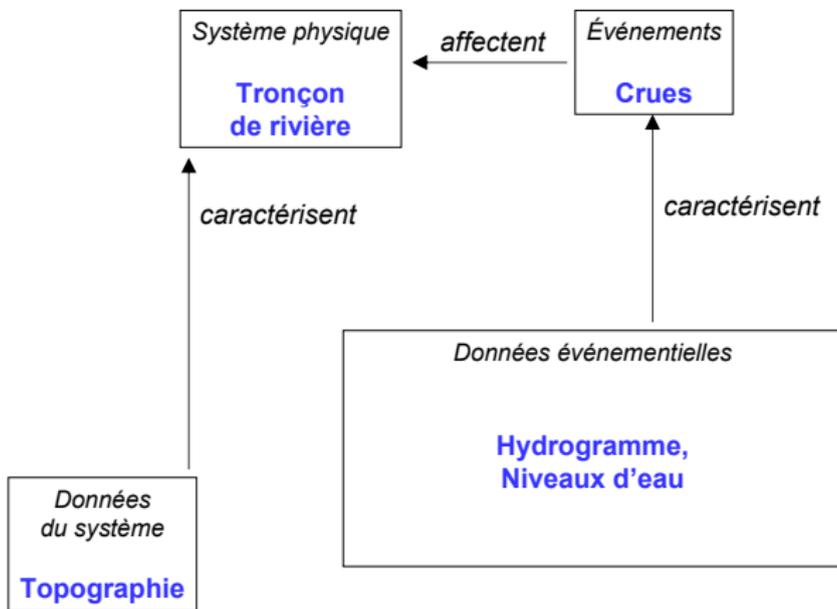
Cette modélisation des connaissances n'est ni **exhaustive** ni **unique**.

# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD

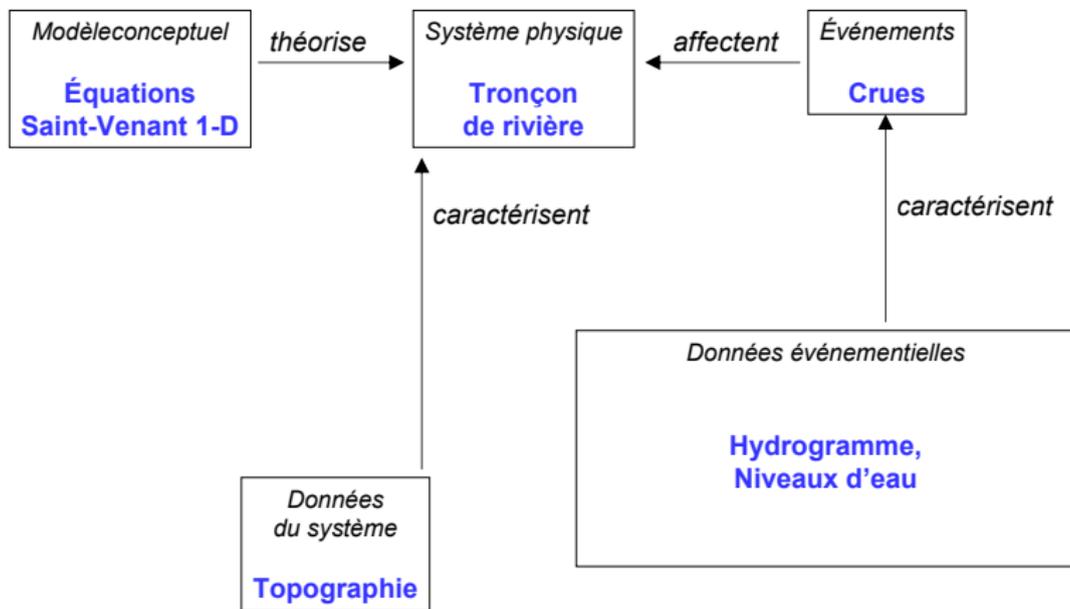
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



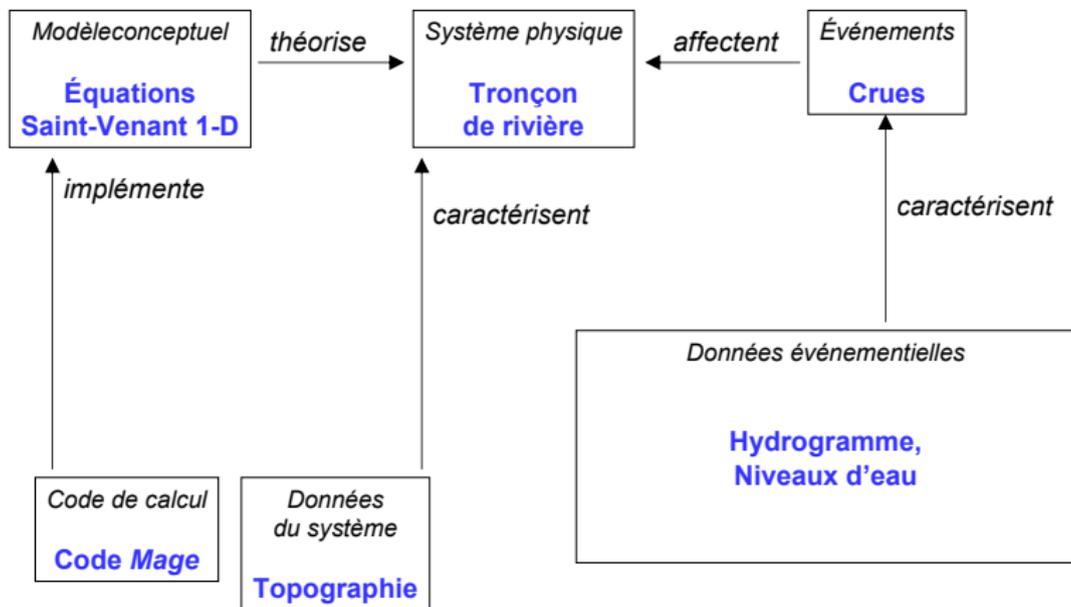
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



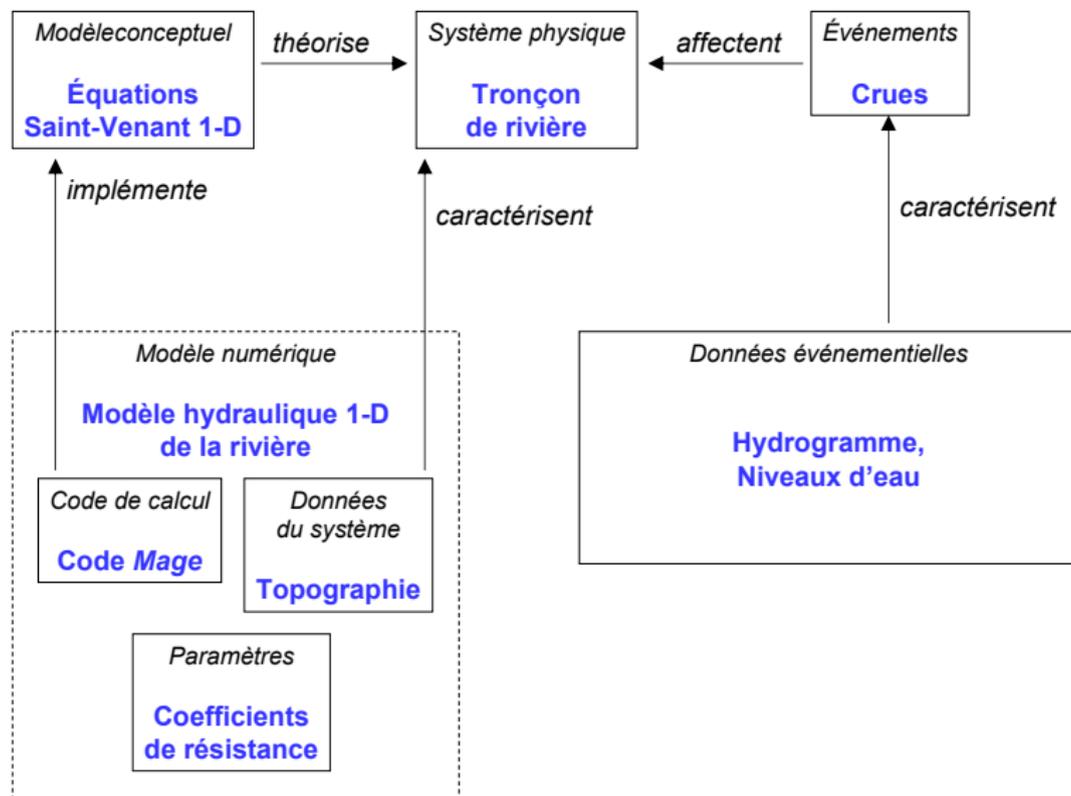
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



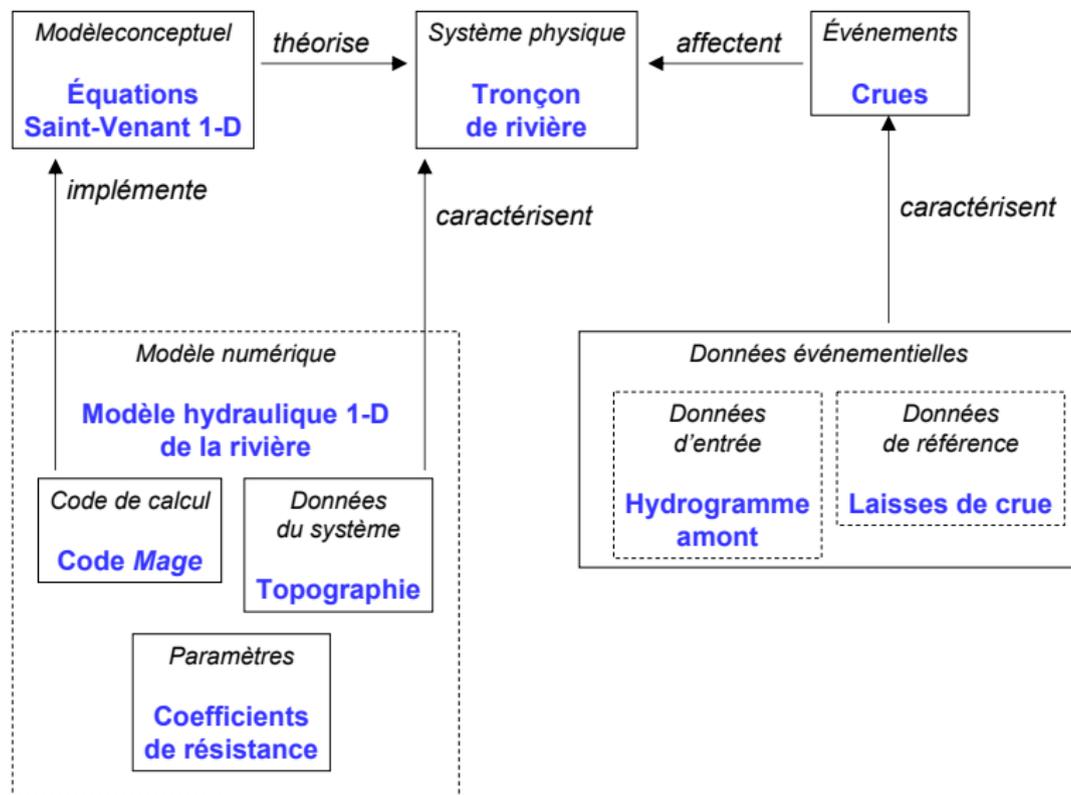
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



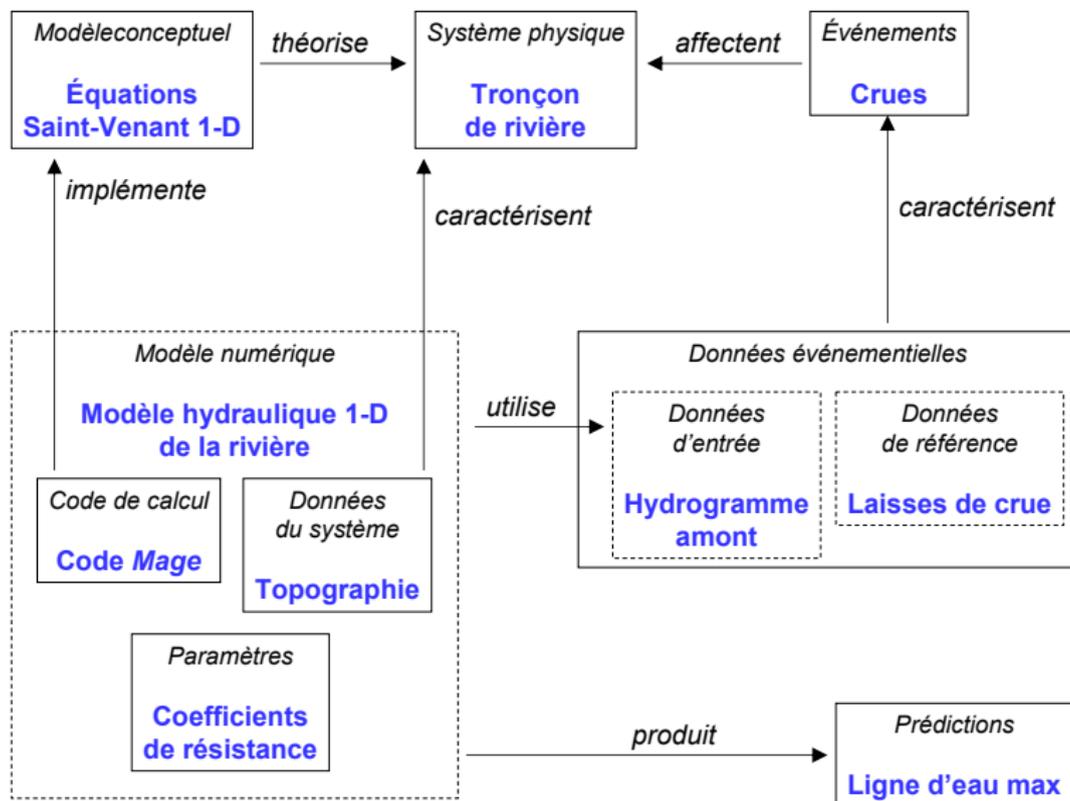
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



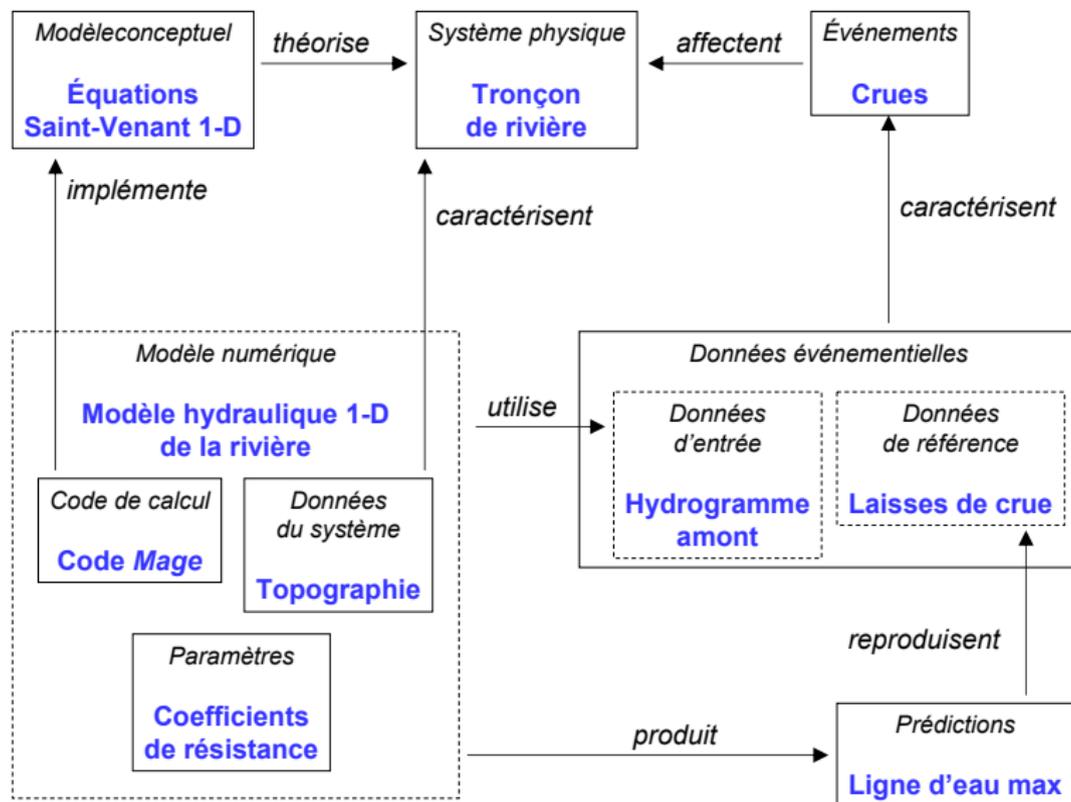
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



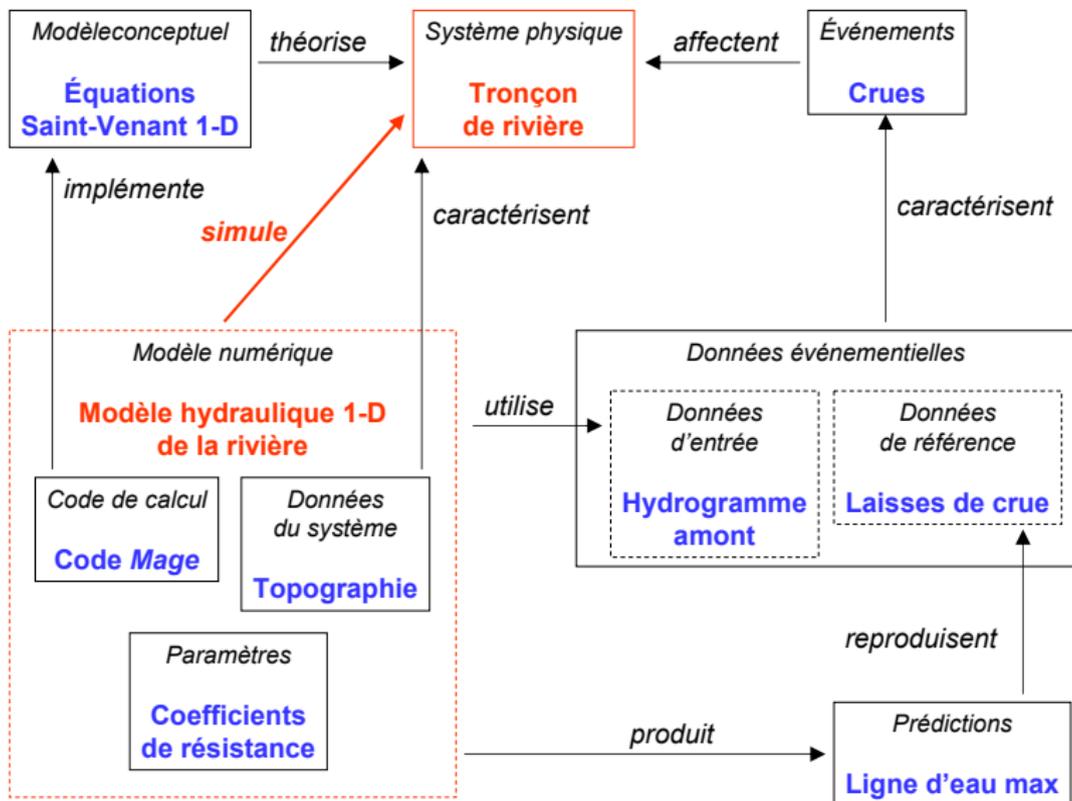
# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD



# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD

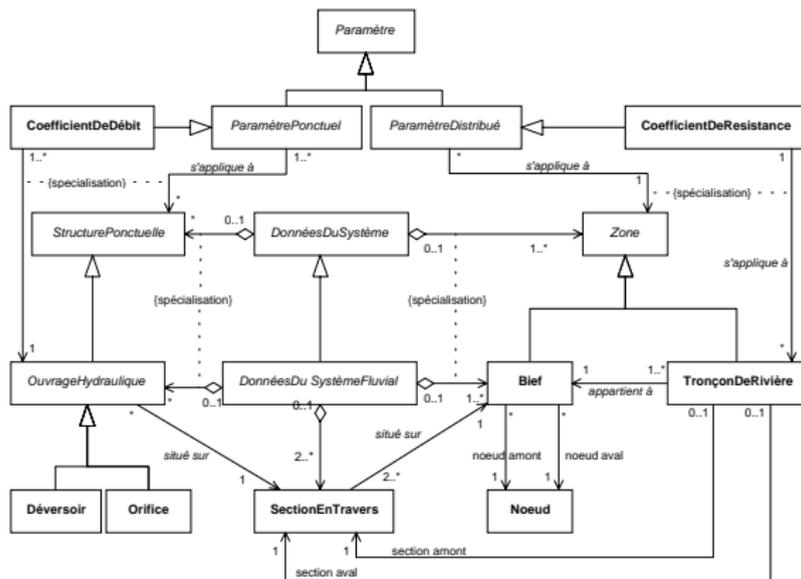


# Extrait des ontologies ONTOVAL et ONTOHYD

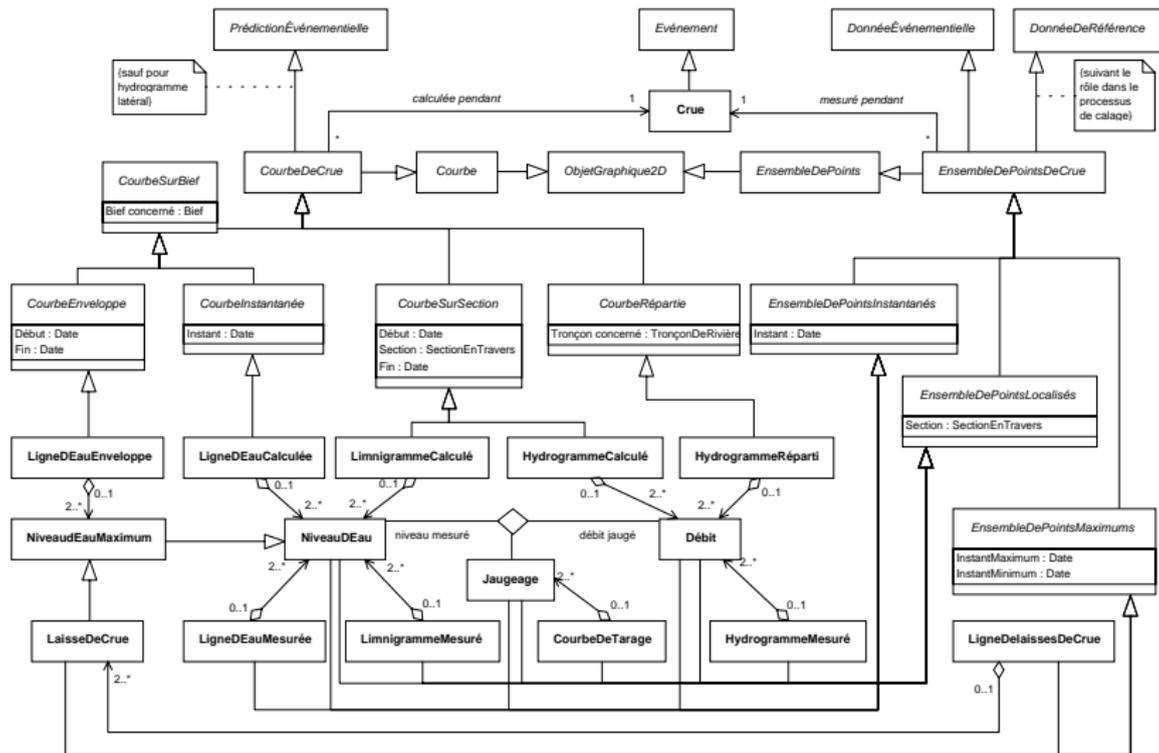




# ONTOHYD(1/2)



# ONTOHYD(2/2)



# Les procédures

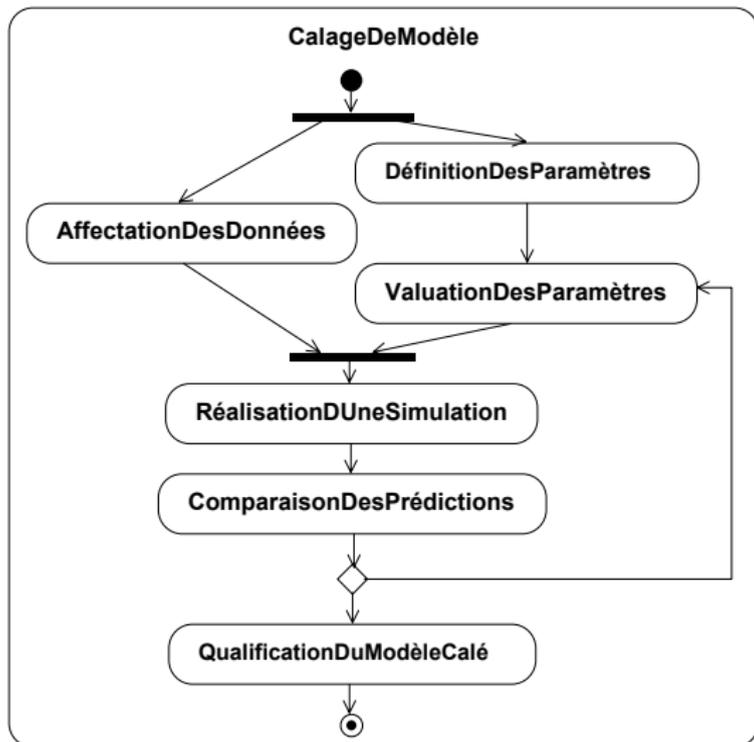
## Connaissances inférentielles (1/2)

# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Décomposition du processus de calage

- 6 tâches principales
- 24 sous-tâches



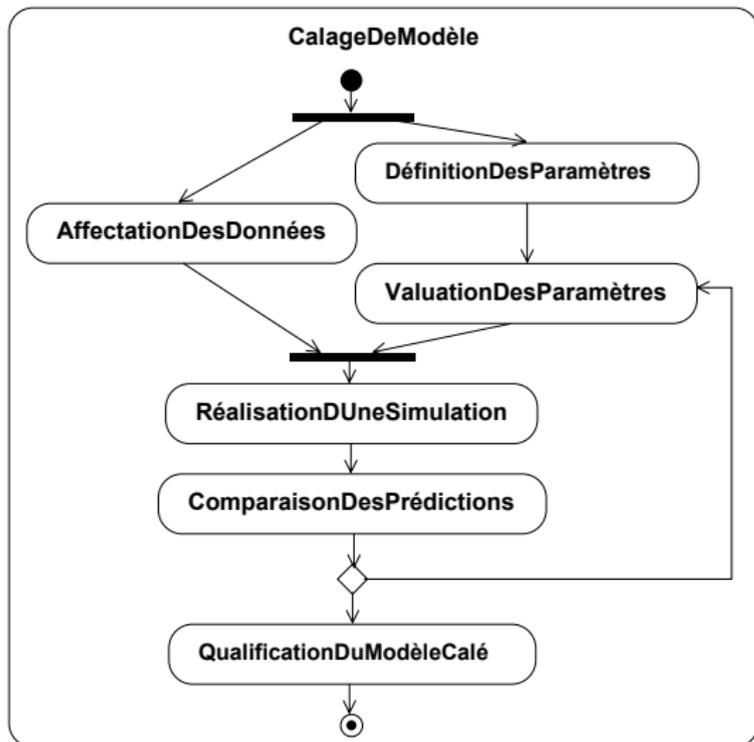
# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Affectation des données

Pour une crue :

- **données d'entrée** :  
condition limite  
amont, condition  
limite aval...
- **données de  
références** :  
niveaux d'eau,  
laisses de crues...



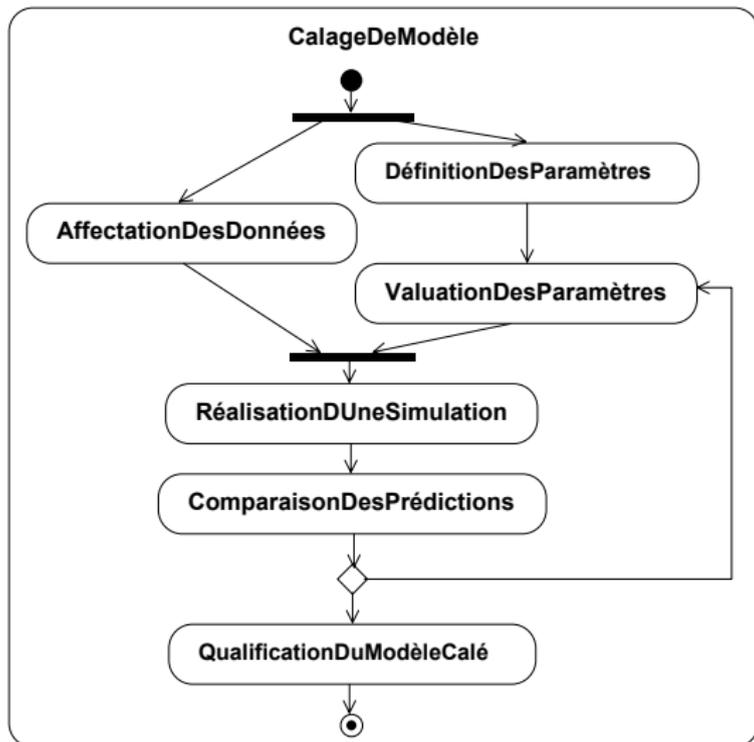
# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Définition des paramètres

- **locaux** :  
coefficient de débit des ouvrages
- **distribués** :  
coefficients de résistance

Déterminer les zones de résistance homogène

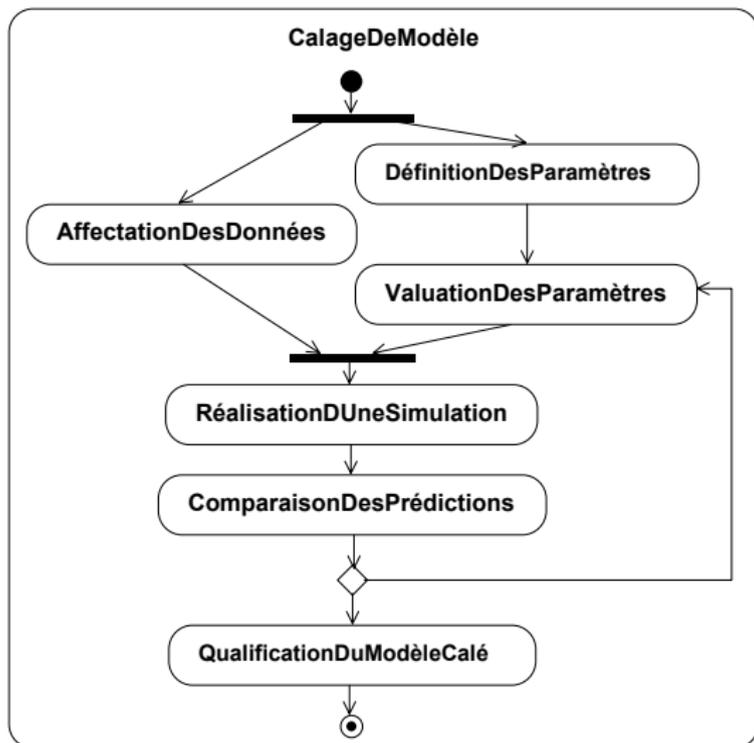


# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Valuation des paramètres

- intervalle de variation
- valeur courante

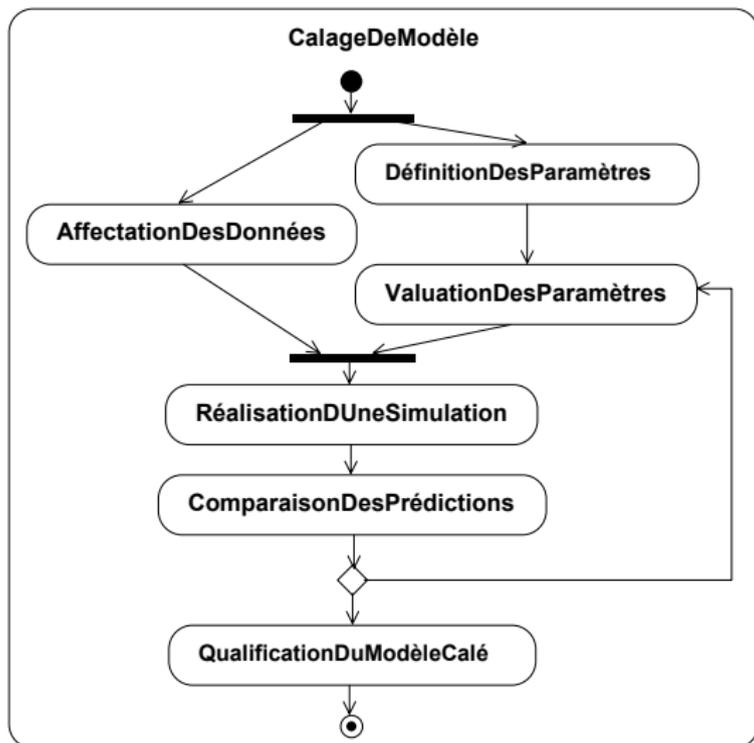


# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Réalisation d'une simulation

- création des fichiers d'entrée
- exécution du code
- exploitation des fichiers de sortie

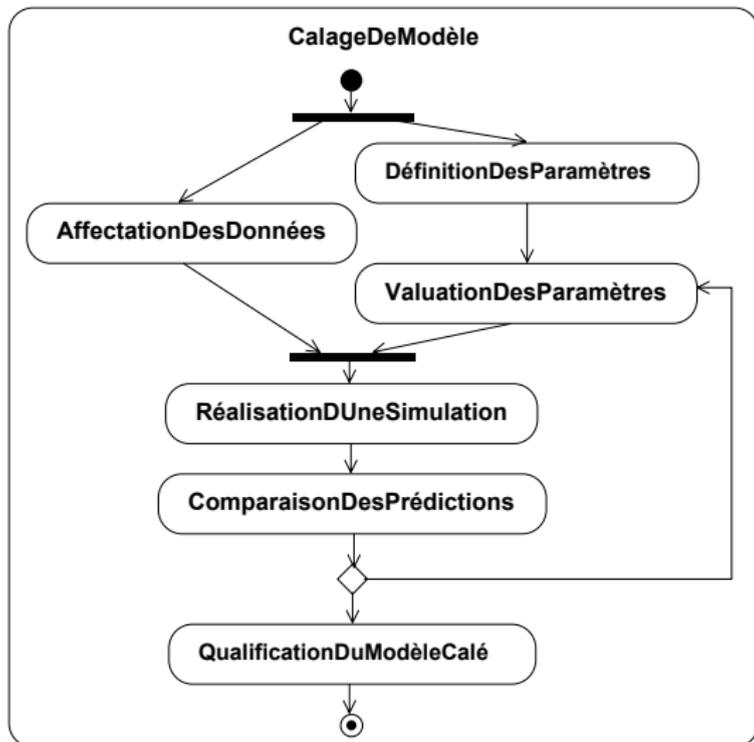


# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Comparaison des prédictions

- sélection des prédictions
- émission de jugements
- sélection éventuelle des paramètres à modifier



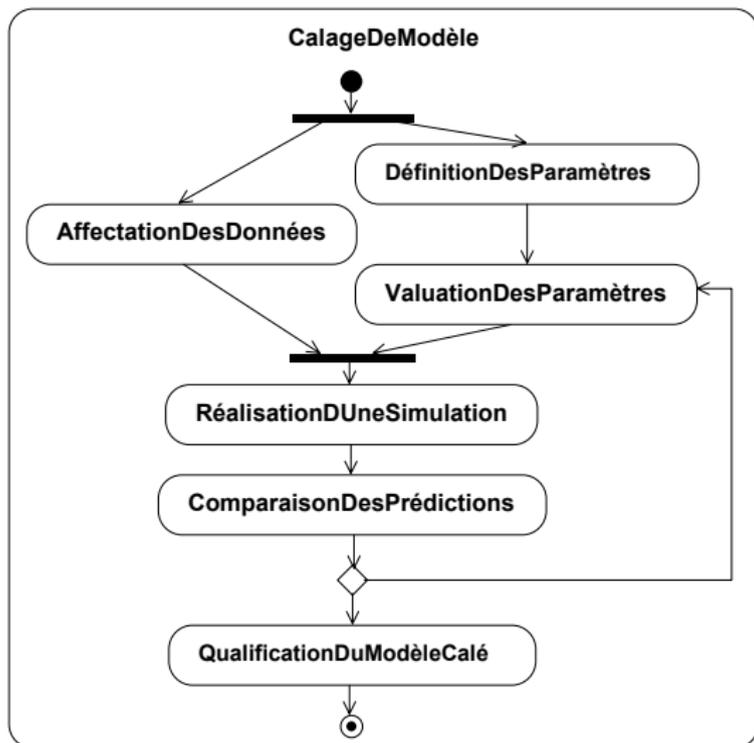
# Les procédures

## Connaissances inférentielles (1/2)

### Qualification du modèle calé

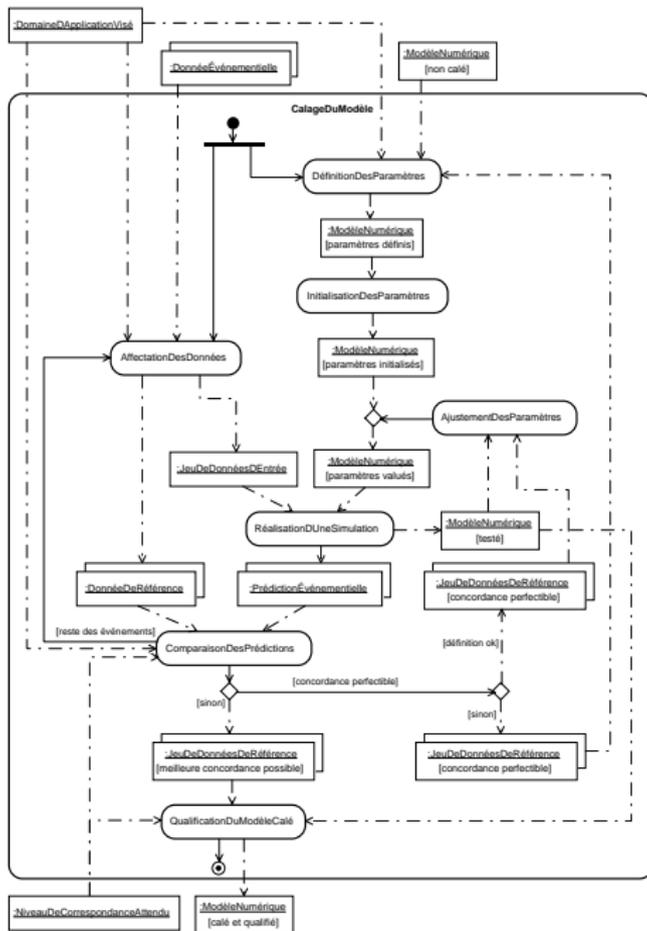
confrontation des  
résultats obtenus avec  
l'objectif du modèle :

- domaine  
d'application visé
- niveau de  
correspondance  
attendu



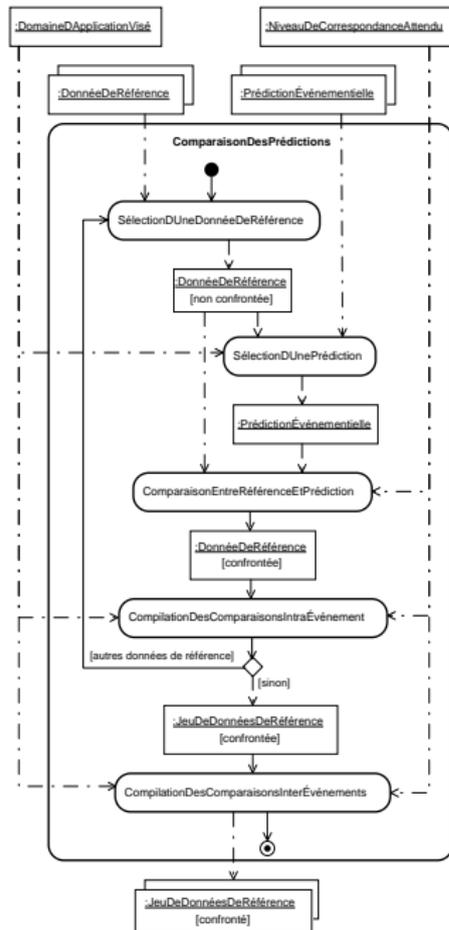
# Structure d'inférence de la tâche de calage

## Diagramme d'activités UML



## Zoom sur la tâche de comparaison des prédictions

### Diagramme d'activités UML



# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

### Règles d'inférence

*Si Conditions Alors Actions*

# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

### Règles d'inférence

*Si Conditions Alors Actions*

### Exemples

- Si aucun hydrogramme n'est disponible à l'amont du domaine,

# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

### Règles d'inférence

*Si Conditions Alors Actions*

### Exemples

- Si aucun hydrogramme n'est disponible à l'amont du domaine, *on prendra comme condition limite amont un hydrogramme enregistré sur le tronçon en le décalant temporellement.*

# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

### Règles d'inférence

*Si Conditions Alors Actions*

### Exemples

- Si aucun hydrogramme n'est disponible à l'amont du domaine, *on prendra comme condition limite amont un hydrogramme enregistré sur le tronçon en le décalant temporellement.*
- Si le cours d'eau est une petite rivière de plaine, propre, sinueuse, avec quelques seuils et mouilles,

# Les raisonnements

## Connaissances inférentielles (2/2)

### Règles d'inférence

*Si Conditions Alors Actions*

### Exemples

- Si aucun hydrogramme n'est disponible à l'amont du domaine, *on prendra comme condition limite amont un hydrogramme enregistré sur le tronçon en le décalant temporellement.*
- Si le cours d'eau est une petite rivière de plaine, propre, sinueuse, avec quelques seuils et mouilles, *le coefficient de Manning sera compris entre 0,033 et 0,045.* [Chow, 1959]

# Plan

- 1 Modélisation des connaissances
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage**
  - Pilotage de programmes
  - Prototype CaRMA-1
- 3 Mise en œuvre opérationnelle
- 4 Extensions du système
- 5 Conclusions et perspectives

# Pilotage de programmes

## Notions

### Intérêt pour le calage de modèles numériques

- modélisation et mise en œuvre des connaissances : outils d'intelligence artificielle
- concepts communs entre pilotage et calage
- techniques utilisées au sein du projet ORION

# Pilotage de programmes

## Notions

### Intérêt pour le calage de modèles numériques

- modélisation et mise en œuvre des connaissances : outils d'intelligence artificielle
- concepts communs entre pilotage et calage
- techniques utilisées au sein du projet ORION

### Principes

Utilisation **optimale** des programmes existants pour satisfaire un **objectif donné**

# Pilotage de programmes

## Notions

### Intérêt pour le calage de modèles numériques

- modélisation et mise en œuvre des connaissances : outils d'intelligence artificielle
- concepts communs entre pilotage et calage
- techniques utilisées au sein du projet ORION

### Principes

Utilisation optimale des programmes existants pour satisfaire un objectif donné

- 1 construction d'un plan d'enchaînement des programmes

# Pilotage de programmes

## Notions

### Intérêt pour le calage de modèles numériques

- modélisation et mise en œuvre des connaissances : outils d'intelligence artificielle
- concepts communs entre pilotage et calage
- techniques utilisées au sein du projet ORION

### Principes

Utilisation optimale des programmes existants pour satisfaire un objectif donné

- ① construction d'un plan d'enchaînement des programmes
- ② **exécution** et **contrôle automatiques** des programmes :
  - gestion des entrées et des sorties
  - script d'exécution
  - règles de détection d'erreurs et de réparation

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances
- possibilité de représenter textuellement des concepts, des procédures et des raisonnements

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances
- possibilité de représenter textuellement des concepts, des procédures et des raisonnements
- constitution d'une **base de connaissances**

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances
- possibilité de représenter textuellement des concepts, des procédures et des raisonnements
- constitution d'une base de connaissances

### PEGASE+

- moteur d'inférence

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances
- possibilité de représenter textuellement des concepts, des procédures et des raisonnements
- constitution d'une base de connaissances

### PEGASE+

- moteur d'inférence
- exploitation de la base de connaissances

# Pilotage de programmes

## Outils

### YAKL

- langage de représentation de connaissances
- possibilité de représenter textuellement des concepts, des procédures et des raisonnements
- constitution d'une base de connaissances

### PEGASE+

- moteur d'inférence
- exploitation de la base de connaissances
- $YAKL \xrightarrow{\text{interpréteur}} C++ \xrightarrow[\text{compilateur}]{PEGASE+} \text{systeme.exe}$

# CARMA-1

## Description

### Premier prototype

- *Calibration of River Model Assistant*
- construit avec les outils de pilotage
- fait appel au code MAGE

# CARMA-1

## Description

### Premier prototype

- *Calibration of River Model Assistant*
- construit avec les outils de pilotage
- fait appel au code MAGE

### Base de connaissances

- 1 connaissances génériques sur le calage
- 2 connaissances du domaine de l'hydraulique
- 3 connaissances sur l'utilisation du code MAGE

# CARMA-1

## Description

### Premier prototype

- *Calibration of River Model Assistant*
- construit avec les outils de pilotage
- fait appel au code MAGE

### Base de connaissances

- 1 connaissances génériques sur le calage
- 2 connaissances du domaine de l'hydraulique
- 3 connaissances sur l'utilisation du code MAGE

### Base de faits pour des cas d'étude

# CARMA-1

## Description

### Premier prototype

- *Calibration of River Model Assistant*
- construit avec les outils de pilotage
- fait appel au code MAGE

### Base de connaissances

- 1 connaissances génériques sur le calage
- 2 connaissances du domaine de l'hydraulique
- 3 connaissances sur l'utilisation du code MAGE

### Base de faits pour des cas d'étude

- déclaration du **modèle numérique** et de son **objectif**

# CARMA-1

## Description

### Premier prototype

- *Calibration of River Model Assistant*
- construit avec les outils de pilotage
- fait appel au code MAGE

### Base de connaissances

- 1 connaissances génériques sur le calage
- 2 connaissances du domaine de l'hydraulique
- 3 connaissances sur l'utilisation du code MAGE

### Base de faits pour des cas d'étude

- déclaration du modèle numérique et de son objectif
- déclaration des **données** disponibles

# CARMA-1

## Fonctionnement automatique

### Système

### Utilisateur

# CARMA-1

## Fonctionnement automatique

### Système

- Prend en charge intégralement 21 sous-tâches sur 24 :
  - applique des raisonnements «experts»
  - pilote le code MAGE

### Utilisateur

# CARMA-1

## Fonctionnement automatique

### Système

- Prend en charge intégralement 21 sous-tâches sur 24 :
  - applique des raisonnements «experts»
  - pilote le code MAGE
- Réalise les autres tâches en interaction avec l'utilisateur :
  - affiche les courbes comparatives
  - pose des questions à l'utilisateur

### Utilisateur

# CARMA-1

## Fonctionnement automatique

### Système

- Prend en charge intégralement 21 sous-tâches sur 24 :
  - applique des raisonnements « experts »
  - pilote le code MAGE
- Réalise les autres tâches en interaction avec l'utilisateur :
  - affiche les courbes comparatives
  - pose des questions à l'utilisateur

### Utilisateur

Effectue un choix parmi les réponses proposées par le système lors de la réalisation des sous-tâches :

- *définition des zones de résistance homogènes*
- *initialisation des coefficients de résistance*
- *comparaison entre référence et prédiction*

# Plan

- 1 Modélisation des connaissances
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage
- 3 Mise en œuvre opérationnelle**
  - Calage d'un modèle de la Lèze
  - Calage d'un modèle de l'Hogneau
  - Discussion
- 4 Extensions du système
- 5 Conclusions et perspectives

# Calage d'un modèle de la Lèze

## Présentation

### Contexte

- affluent de l'Ariège

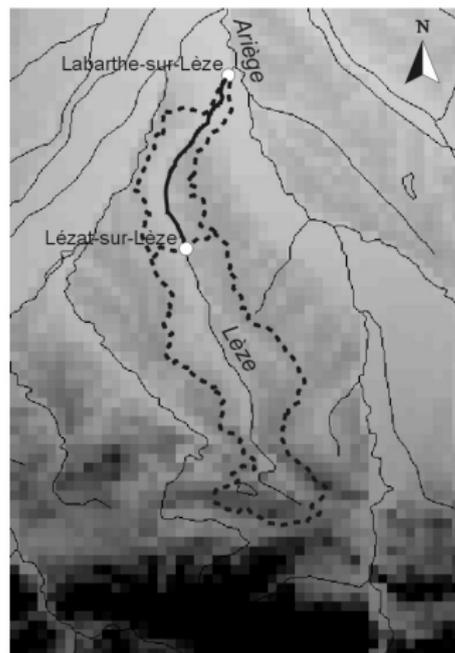


# Calage d'un modèle de la Lèze

## Présentation

### Contexte

- affluent de l'Ariège
- tronçon de 27 km entre 2 stations hydrométriques
- crue de février 2000 : données **externes** seulement



# Calage d'un modèle de la Lèze

## Présentation

### Contexte

- affluent de l'Ariège
- tronçon de 27 km entre 2 stations hydrométriques
- crue de février 2000 : données externes seulement

### Objectif du modèle

- modèle destiné à la prévision de crues
- bonne reproduction de la dynamique de crue



# Calage d'un modèle de la Lèze

## Initialisation des coefficients de résistance

### Méthodes implémentées

#### Méthode de Chow

Typologie de cours d'eau :

- canaux creusés ou dragués
- canaux revêtus ou bâtis
- rivières naturelles
- plaines d'inondations

# Calage d'un modèle de la Lèze

## Initialisation des coefficients de résistance

### Méthodes implémentées

#### Méthode de Chow

Typologie de cours d'eau :

- canaux creusés ou dragués
- canaux revêtus ou bâtis
- rivières naturelles
- plaines d'inondations

#### Méthode de Cowan

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m$$

où :

- $n_b$  matériau du fond
- $n_1$  irrégularités
- $n_2$  variations de section
- $n_3$  obstructions
- $n_4$  végétation
- $m$  sinuosité

# Calage d'un modèle de la Lèze

## Initialisation des coefficients de résistance

### Attribution d'une valeur pour les berges

- Requête du système :



# Calage d'un modèle de la Lèze

## Initialisation des coefficients de résistance

### Attribution d'une valeur pour les berges

- Requête du système :

Type de buissons ?

1. *épars et mauvaises herbes*
2. *légers et arbres, sans feuilles*
3. *légers et arbres, avec des feuilles*
4. *assez épais à épais, sans feuilles*
5. *assez épais à épais, avec des feuilles*

- Réponse de l'utilisateur :

2. *Buissons légers et arbres, sans feuilles*



# Calage d'un modèle de la Lèze

## Initialisation des coefficients de résistance

### Attribution d'une valeur pour les berges

- Requête du système :

Type de buissons ?

1. *épars et mauvaises herbes*
2. *légers et arbres, sans feuilles*
3. *légers et arbres, avec des feuilles*
4. *assez épais à épais, sans feuilles*
5. *assez épais à épais, avec des feuilles*

- Réponse de l'utilisateur :

2. *Buissons légers et arbres, sans feuilles*



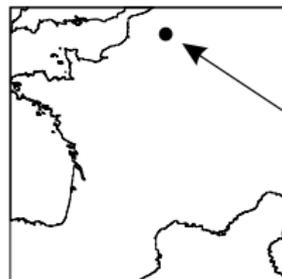
$$\implies n_{min} = 0,035 \quad n_{ini} = 0,050 \quad n_{max} = 0,060$$

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Présentation

### Contexte

- bassin versant de l'Escaut



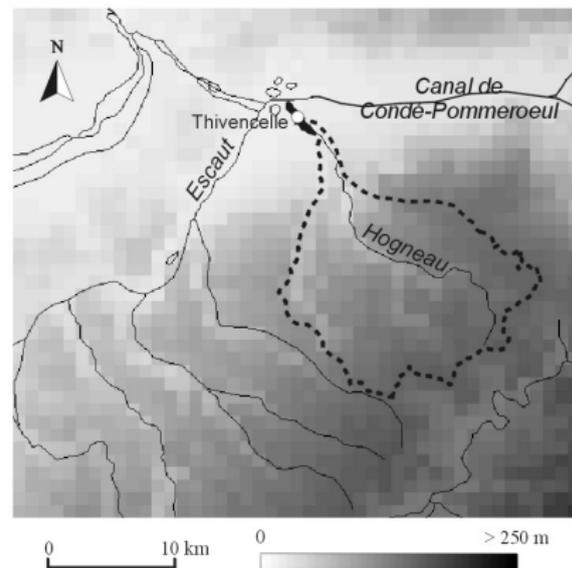
Hogneau

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Présentation

### Contexte

- bassin versant de l'Escaut
- tronçon de 5 km, endigué
- station hydrométrique
- crue de février 2002 : données **internes**



# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Présentation

### Contexte

- bassin versant de l'Escaut
- tronçon de 5 km, endigué
- station hydrométrique
- crue de février 2002 : données internes

### Objectif du modèle

- modèle destiné au dimensionnement d'ouvrages de protection
- bonne reproduction des niveaux d'eau maximum



# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Affectation automatique des données

### Sélection des données d'entrée

- Condition limite amont  
*Décalage de l'hydrogramme enregistré à la station*

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Affectation automatique des données

### Sélection des données d'entrée

- Condition limite amont  
*Décalage de l'hydrogramme enregistré à la station*
- Condition limite aval  
*Création d'une condition critique sur le seuil aval*

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Affectation automatique des données

### Sélection des données d'entrée

- Condition limite amont  
*Décalage de l'hydrogramme enregistré à la station*
- Condition limite aval  
*Création d'une condition critique sur le seuil aval*

### Sélection des données de référence

- Examen du domaine d'application visé
- Choix des niveaux d'eau maximum

```

Rule {
  If domaine_application
    == "dimensionnement"
  Then données.niveauxmax.role
    := "référence" }
  
```

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Comparaison et ajustement des coefficients de résistance

### Comparaison visuelle

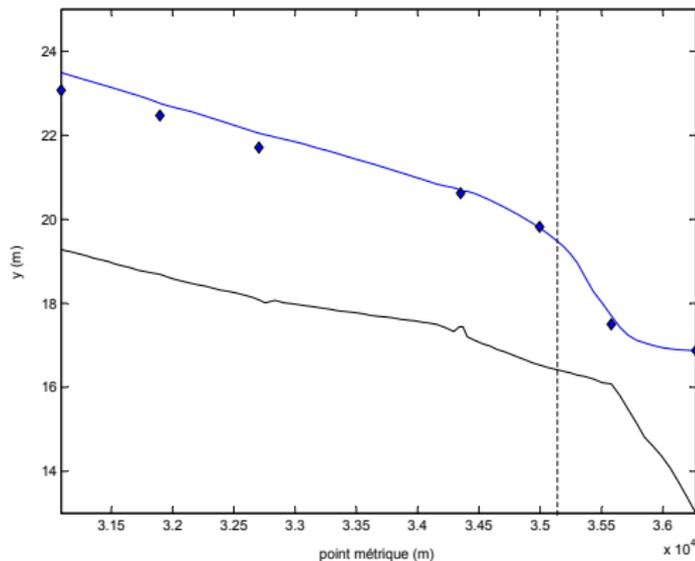
- affichage des graphes
- Requêtes du système :

Écart sur le tronçon aval :  
position relative ?

1. Courbe au-dessus des points
2. Courbe au milieu des points
3. Courbe en-dessous des points

Écart sur le tronçon aval :  
distance relative ?

1. Courbe loin des points
2. Courbe assez loin des points
3. Courbe près des points

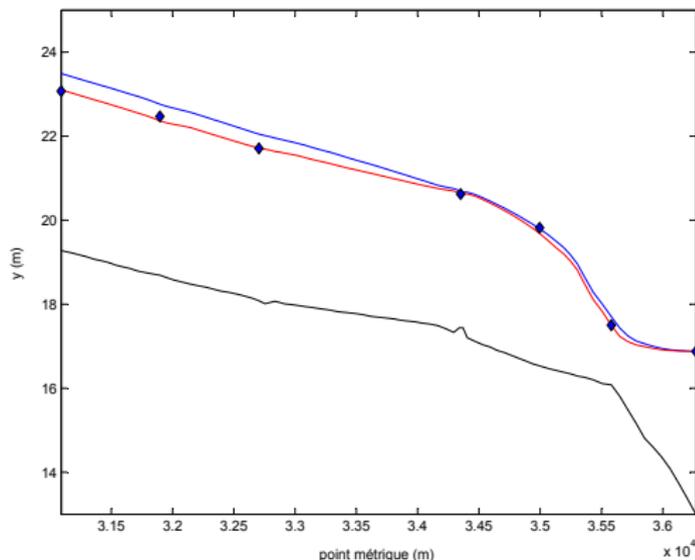


# Calage d'un modèle de l'Hogneau

## Comparaison et ajustement des coefficients de résistance

### Ajustement automatique

- itératif de l'aval vers l'amont
- dans les limites des intervalles de variation



# Discussion

## Cas d'étude

### Situations de calage

- variées :
  - domaine d'application visé
  - données disponibles

# Discussion

## Cas d'étude

### Situations de calage

- variées :
  - domaine d'application visé
  - données disponibles
- courantes en ingénierie :  
«Comment faire au mieux avec les données disponibles ?»

# Discussion

## Cas d'étude

### Situations de calage

- variées :
  - domaine d'application visé
  - données disponibles
- courantes en ingénierie :  
«Comment faire au mieux avec les données disponibles ?»

### Tests à effectuer

- réaliser un calage sur plusieurs événements

# Discussion

## Cas d'étude

### Situations de calage

- variées :
  - domaine d'application visé
  - données disponibles
- courantes en ingénierie :  
«Comment faire au mieux avec les données disponibles ?»

### Tests à effectuer

- réaliser un calage sur plusieurs événements
- comparer avec un calage entièrement «manuel»

# Discussion

## Prototype CARMA-1

### Fonctionnement interactif

- tâche de comparaison à la charge de l'utilisateur
- ajustement des paramètres basé sur comparaison **visuelle**

# Discussion

## Prototype CARMA-1

### Fonctionnement interactif

- tâche de comparaison à la charge de l'utilisateur
- ajustement des paramètres basé sur comparaison visuelle

Est-il possible d'automatiser cette tâche ?

# Discussion

## Prototype CARMA-1

### Fonctionnement interactif

- tâche de comparaison à la charge de l'utilisateur
- ajustement des paramètres basé sur comparaison visuelle

Est-il possible d'automatiser cette tâche ?

### Utilisation d'outils de pilotage de programmes

- pilotage et calage : tâches proches mais différentes
- tâche de calage «simulée» à l'aide d'artefacts de pilotage
- difficultés pratiques pour ajouter de nouvelles connaissances

# Discussion

## Prototype CARMA-1

### Fonctionnement interactif

- tâche de comparaison à la charge de l'utilisateur
- ajustement des paramètres basé sur comparaison visuelle

Est-il possible d'automatiser cette tâche ?

### Utilisation d'outils de pilotage de programmes

- pilotage et calage : tâches proches mais différentes
- tâche de calage «simulée» à l'aide d'artefacts de pilotage
- difficultés pratiques pour ajouter de nouvelles connaissances

Est-il possible d'obtenir un système plus évolutif ?

# Plan

- 1 Modélisation des connaissances
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage
- 3 Mise en œuvre opérationnelle
- 4 Extensions du système**
  - Automatisation de la tâche de comparaison
  - Développement d'outils d'IA dédiés au calage
- 5 Conclusions et perspectives

# Automatisation de la tâche de comparaison

## Utilisation d'un module d'évaluation symbolique de courbes

### Motivation

- Hydraulique fluviale 1-D : utilisation de courbes
- Expert raisonne de manière symbolique sur ces courbes

# Automatisation de la tâche de comparaison

## Utilisation d'un module d'évaluation symbolique de courbes

### Motivation

- Hydraulique fluviale 1-D : utilisation de courbes
- Expert raisonne de manière symbolique sur ces courbes

### Description symbolique

- lissage et segmentation
- attribution de qualificatifs aux segments, aux pics et aux ruptures de pente
- dictionnaire numérique-symbolique défini par l'expert

# Automatisation de la tâche de comparaison

## Utilisation d'un module d'évaluation symbolique de courbes

### Motivation

- Hydraulique fluviale 1-D : utilisation de courbes
- Expert raisonne de manière symbolique sur ces courbes

### Description symbolique

- lissage et segmentation
- attribution de qualificatifs aux segments, aux pics et aux ruptures de pente
- dictionnaire numérique-symbolique défini par l'expert

### Comparaison automatique

- Comparaison de deux courbes
- Comparaison d'une courbe à un ensemble de points

# Automatisation de la tâche de comparaison

## Intégration d'un code d'optimisation

### Test sur le modèle de l'Hogneau

- implémentation autonome d'un algorithme d'optimisation globale (recuit simulé)
- fonction coût : erreur moyenne entre ligne d'eau maximum calculée et niveaux d'eau maximums observés
- ajustement des coefficients de résistance

# Automatisation de la tâche de comparaison

## Intégration d'un code d'optimisation

### Test sur le modèle de l'Hogneau

- implémentation autonome d'un algorithme d'optimisation globale (recuit simulé)
- fonction coût : erreur moyenne entre ligne d'eau maximum calculée et niveaux d'eau maximums observés
- ajustement des coefficients de résistance

### Conclusions

- augmentation du nombre de simulations par rapport au calage assisté à l'aide de CARMA-1 : 10  $\rightarrow$  1000 – 10000
- faible réduction de l'erreur : 11 *cm*  $\rightarrow$  9 *cm*
- importance des connaissances *a priori*
  - réduction du nombre de simulations
  - discrimination des jeux de paramètres aberrants

# Développement d'outils d'IA dédiés au calage

## Langage de représentation de connaissances

### OVAL

- *Operational Validation Language*

# Développement d'outils d'IA dédiés au calage

## Langage de représentation de connaissances

### OVAL

- *Operational Validation Language*
- Incorporation des éléments de ONTOVAL

```
Numerical Model {  
  Name  
  System  
  Objective  
  Simulation Code  
  System Data  
  ...  
  Parameters  
  ...  
}
```

# Développement d'outils d'IA dédiés au calage

## Langage de représentation de connaissances

### OVAl

- *Operational Validation Language*
- Incorporation des éléments de ONTOVAL
- Déclaration des éléments de ONTOHYD

```

Numerical Model {
  Name   modèle_hydraulique_avec_Mage
  System rivière
  Objective calage_hydraulique
  Simulation Code Mage
  System Data
    bief_étudié name bief
    sections a Set of section_en_travers
  Parameters
    coeff_manning a Set of coefficients_de_résistance
    coeff_débit a Set of coefficients_de_débit
}

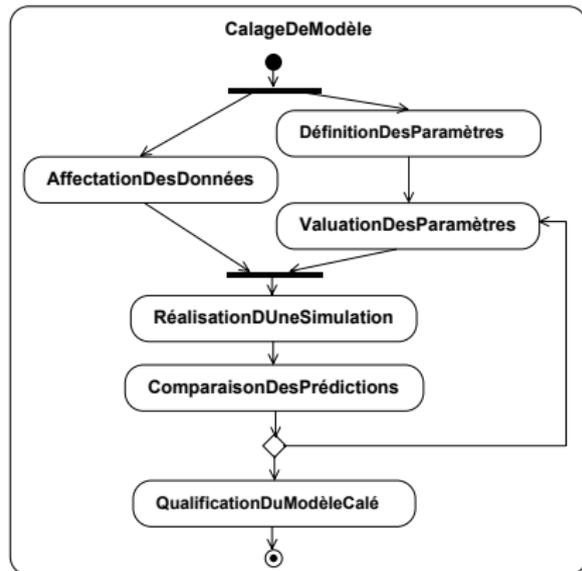
```

# Développement d'outils d'IA dédiés au calage

## Moteur d'inférence

### HYDRE

- Associé au langage OVAL
- Met en œuvre l'ensemble des sous-tâches de la procédure de calage



# Développement d'outils d'IA dédiés au calage

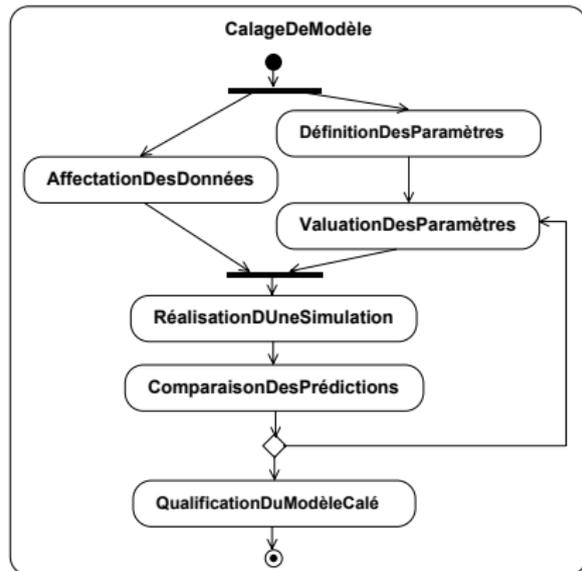
## Moteur d'inférence

### HYDRE

- Associé au langage OVAL
- Met en œuvre l'ensemble des sous-tâches de la procédure de calage

### ⇒ Nouveau prototype

- CARMA-2
- mêmes fonctionnalités
- **foncièrement évolutif**
- uniquement connaissances **métier**



# Plan

- 1 Modélisation des connaissances
- 2 Implémentation d'un système d'assistance au calage
- 3 Mise en œuvre opérationnelle
- 4 Extensions du système
- 5 Conclusions et perspectives**
  - Conclusions
  - Perspectives

# Conclusions

## Capitalisation de connaissances

- utilisation du code MAGE
- formalisation du savoir-faire de l'hydraulicien pour l'établissement d'un «code de bonnes pratiques »
- structure d'inférence de la tâche de calage (HYDRE)

# Conclusions

## Capitalisation de connaissances

- utilisation du code MAGE
- formalisation du savoir-faire de l'hydraulicien pour l'établissement d'un «code de bonnes pratiques »
- structure d'inférence de la tâche de calage (HYDRE)

## Système d'assistance au calage de modèles hydrauliques

- impose le suivi d'un «code de bonnes pratiques» pour le calage
- ouvert à l'introduction de nouvelles méthodes pour faire face à des cas spécifiques

# Conclusions

## Capitalisation de connaissances

- utilisation du code MAGE
- formalisation du savoir-faire de l'hydraulicien pour l'établissement d'un «code de bonnes pratiques »
- structure d'inférence de la tâche de calage (HYDRE)

## Système d'assistance au calage de modèles hydrauliques

- impose le suivi d'un «code de bonnes pratiques» pour le calage
- ouvert à l'introduction de nouvelles méthodes pour faire face à des cas spécifiques

## Outils d'IA dédiés au calage de modèles numériques

**génériques** et applicables dans d'autres domaines

# Perspectives

## Ingénierie des connaissances

Intégrer un système global de gestion des connaissances sur un code

# Perspectives

## Ingénierie des connaissances

Intégrer un système global de gestion des connaissances sur un code

## Hydraulique fluviale

Développer des systèmes d'assistance à des tâches proches :

- analyse de sensibilité des paramètres
- validation de modèle

# Perspectives

## Ingénierie des connaissances

Intégrer un système global de gestion des connaissances sur un code

## Hydraulique fluviale

Développer des systèmes d'assistance à des tâches proches :

- analyse de sensibilité des paramètres
- validation de modèle

## Le calage n'est pas spécifique à l'hydraulique fluviale 1-D

Appliquer les outils d'IA dédiés au calage dans d'autres domaines

- hydraulique fluviale 2-D
- hydrologie
- modélisation couplée hydrologie-hydraulique

**ASSISTANCE AU CALAGE DE MODÈLES  
NUMÉRIQUES EN HYDRAULIQUE FLUVIALE**  
—  
**APPORTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

Jean-Philippe VIDAL

Thèse présentée pour obtenir le diplôme de docteur de  
l'Institut National Polytechnique de Toulouse



18 mars 2005