

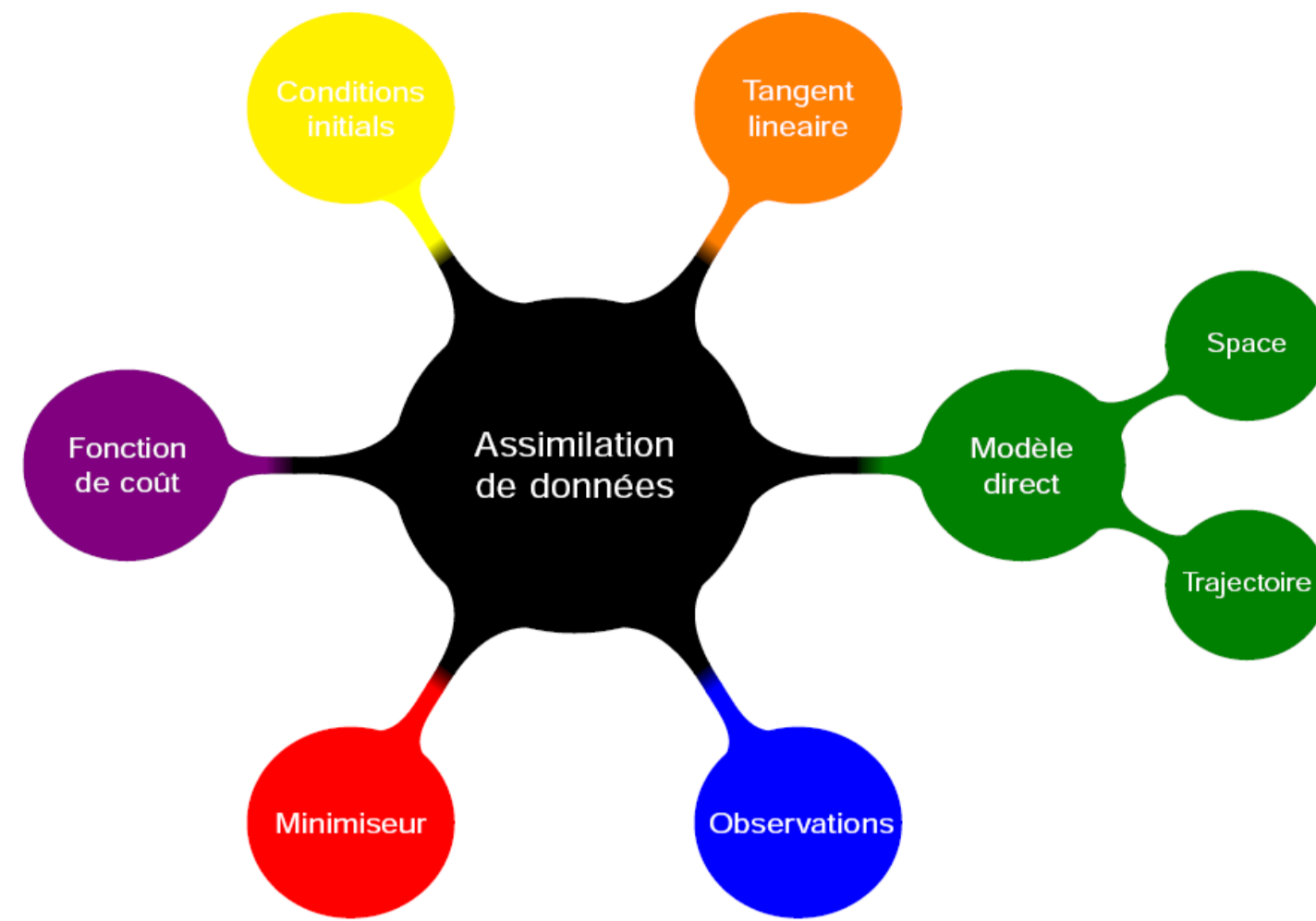
Un logiciel pour l'assimilation variationnelle de données

Luigi NARDI Fouad BADRAN Sylvie THIRIA

Fonctionnalités

Générateur de code C++ pour :

- le modèle numérique direct
- le modèle adjoint
- l'assimilation variationnelle de données



Méthode

Modélisation par un graphe modulaire du modèle direct discrétisé. Ce graphe modulaire est généré à partir d'une description du modèle numérique direct

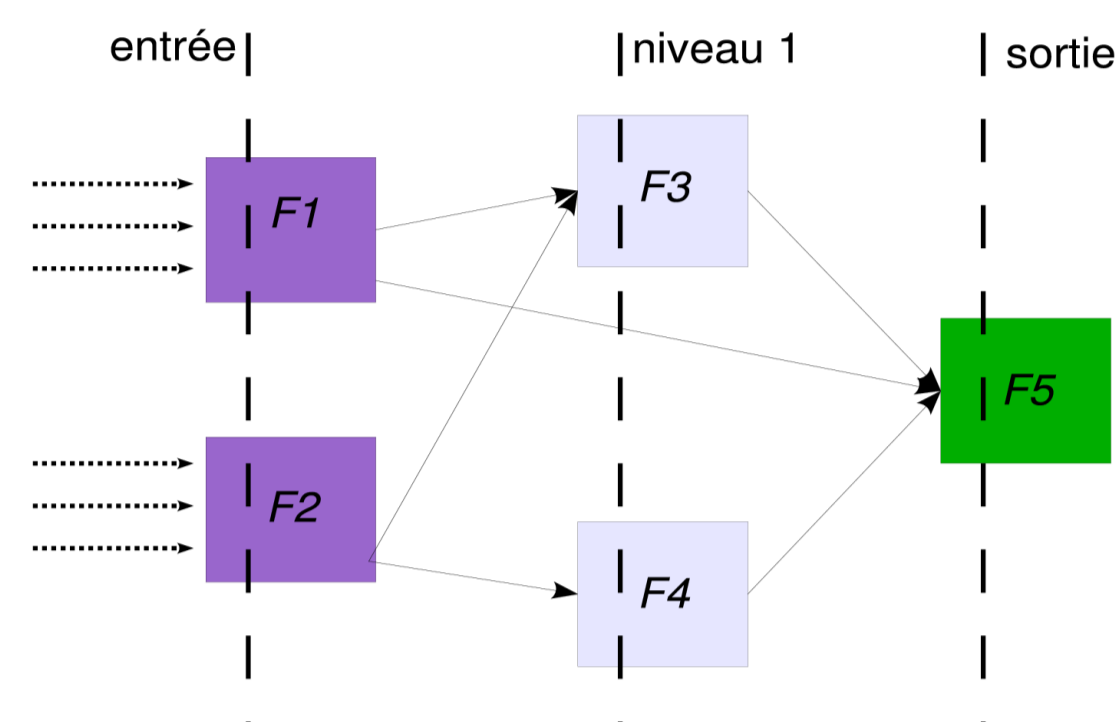
Grappe modulaire

Module : entité de calcul, il reçoit un vecteur en entrée et calcule un vecteur en sortie

Connexion : transmission orienté de données d'un module à un autre

Grappe modulaire : ensemble de modules et connexions dont le fonctionnement global reproduit le modèle numérique direct

Calcul du modèle numérique direct = propagation des données dans le graphe
Calcul du modèle adjoint = rétropropagation de l'erreur dans le graphe



Modèle 2D Shallow Water

(Modèle d'écoulement linéaire d'un fluide non visqueux en eau peu profonde)

Équations physiques

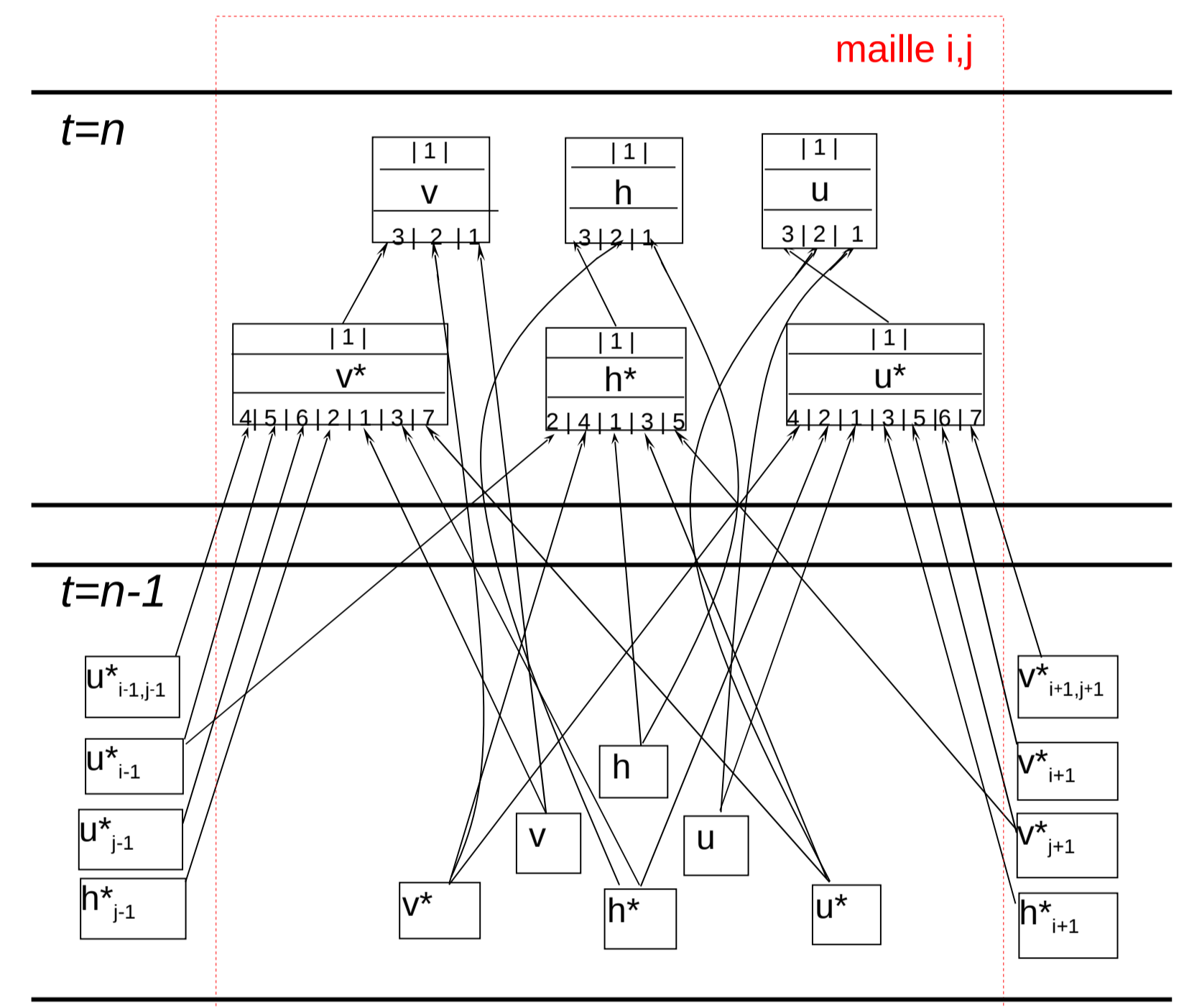
$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g' \frac{\partial h}{\partial x} + f \cdot v - \gamma \cdot u \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g' \frac{\partial h}{\partial y} + f \cdot u - \gamma \cdot v \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -H \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Modèle numérique

discrétisation spatiale (grille C d'Arakawa) et temporelle (leap frog) :

$$\begin{aligned} u_i^* &= u_{i-2} + 2\Delta t \left[\frac{-g'}{\Delta x} [h_{i+1}^{n-1} - h_{i-1}^{n-1}] + \frac{f}{4} [v_{i-1}^{n-1} + v_{i+1}^{n-1} + v_{i-1}^{n-1} + v_{i+1}^{n-1}] - \gamma \cdot u_{i-2} \right] \\ v_i^* &= v_{i-2} + 2\Delta t \left[\frac{-g'}{\Delta y} [h_{i-1}^{n-1} - h_{i+1}^{n-1}] - \frac{f}{4} [u_{i-1}^{n-1} + u_{i+1}^{n-1} + u_{i-1}^{n-1} + u_{i+1}^{n-1}] - \gamma \cdot v_{i-2} \right] \\ h_i^* &= h_{i-2} - 2\Delta t \cdot H \left(\frac{u_{i-1}^* - u_{i+1}^*}{\Delta x} + \frac{v_{i-1}^* - v_{i+1}^*}{\Delta y} \right) \end{aligned}$$

Grappe modulaire



pour l'élimination des oscillations temporelles (Filtre d'Asselin) :

$$\begin{aligned} u_i &= u_i^* + \alpha (u_{i-1}^* - 2u_i^* + u_{i+1}^*) \\ v_i &= v_i^* + \alpha (v_{i-1}^* - 2v_i^* + v_{i+1}^*) \\ h_i &= h_i^* + \alpha (h_{i-1}^* - 2h_i^* + h_{i+1}^*) \end{aligned}$$

Exemple de directives YAO

```
trajectory trajectory_name 100
space space_name 50 50 trajectory_name
(espace à deux dimensions)

module A input 2 output 1
module B input 1 output 1
module C input 1 output 1
...

connection A form B 1 i j t
connection A form C 2 i-1 j t
...

order i j      (ordonnancement des
A B C          calculs dans l'espace)
forder
```

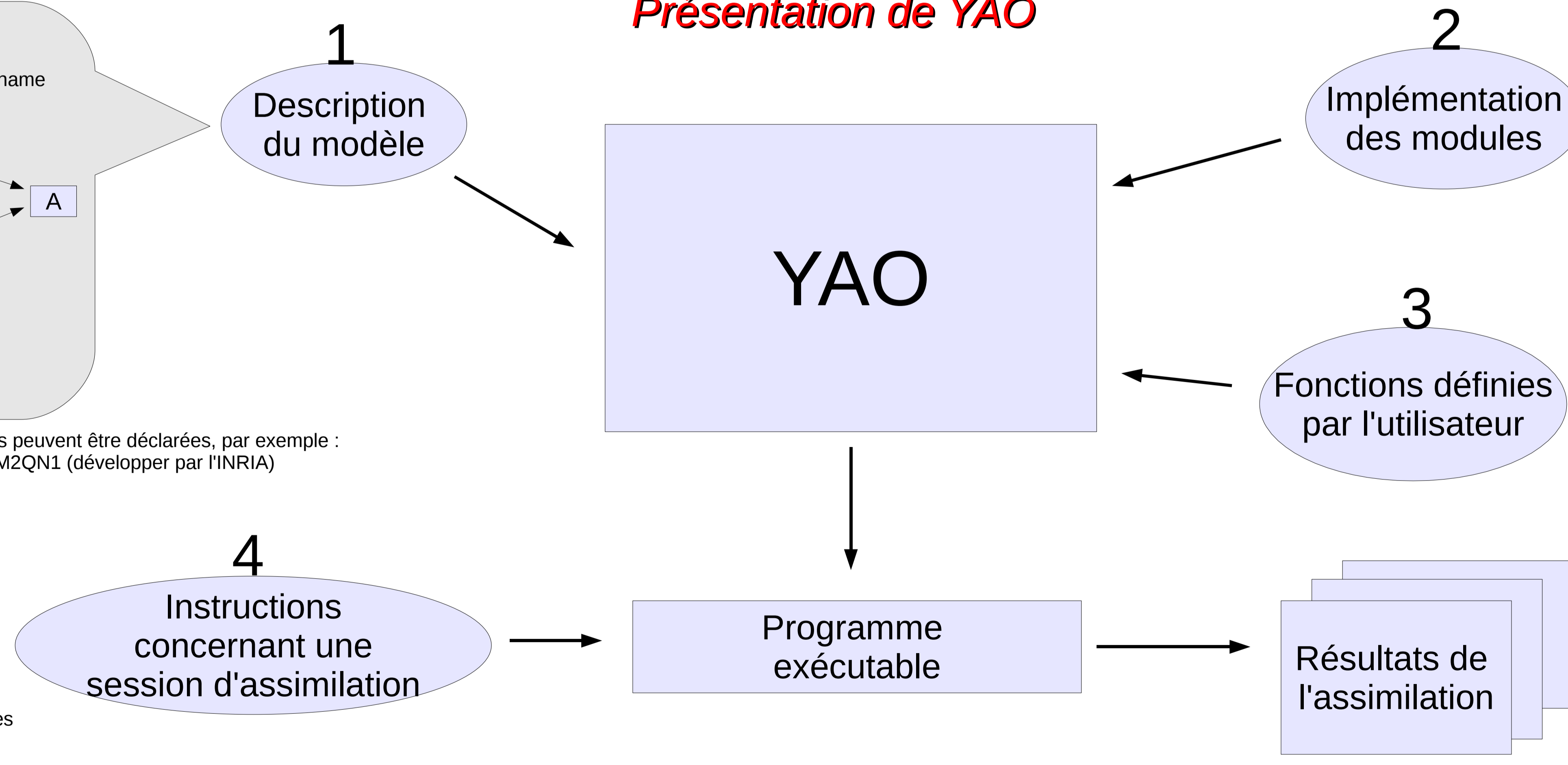
D'autre part, un certain nombre d'options peuvent être déclarées, par exemple :

- utilisation des minimiseurs M1QN3 et M2QN1 (développé par l'INRIA)
- test du gradient des modules

Une session d'assimilation :

- initialisation de la session
- charger les observations
- affichage des résultats intermédiaires
- préciser le nombre d'itérations
- Choix de la fonction de coût
- sauvegarde des résultats
- etc.
- exécuter l'application YAO

Présentation de YAO



Avec les étapes 1,2,3 on génère l'application spécifique YAO (programme exécutable). A partir de cette application YAO, on peut lancer diverses sessions d'assimilation.

Exemple d'un module A défini par la fonction analytique ($2x^2 + y$)

```
forward(real x, real y) {
  sortie1 = 2x^2 + y; (modèle direct de A)
}

backward(real x, real y) {
  gradient1 = 4x; (modèle tangent linéaire)
  gradient2 = 1;
}
```

Remarque :

- YAO permet de générer automatiquement le forward et le backward pour un module défini par réseaux de neurones
- Au niveau conceptuel, permet d'intégrer des codes déjà compilés pour le forward et le backward

Assimilation grande facilitée à suivre l'évolution des modèles physiques

Applications développées avec YAO :

- **Couleur de l'océan** inversion du transfert radiatif pour la restitution de la chlorophylle-a
- **Acoustique marine** profil de célérité du son et paramètres géoacoustiques (célérité, densité, atténuation, ...)
- **Pisces** modèle océanographique pour l'étude de la concentration de traceurs biogéochimiques
- ...

Perspectives :

- Interface graphique
- Optimisation
- Parallélisation automatique
- Obtenir l'adjoint séparément par rapport au reste du code généré
- Couplage spatiale