

# Modélisation dynamique de l'impact d'une Centrale à Cycles Combinés Gaz (CCCG)

Présentation du stage

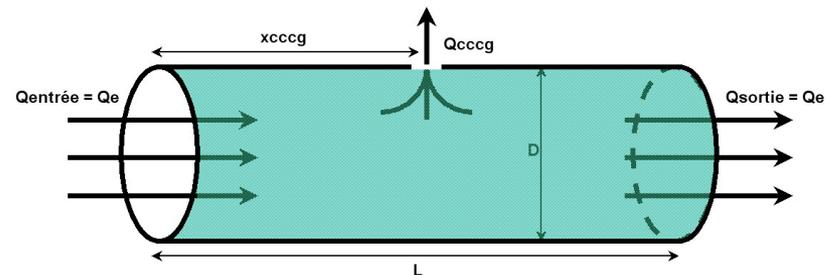
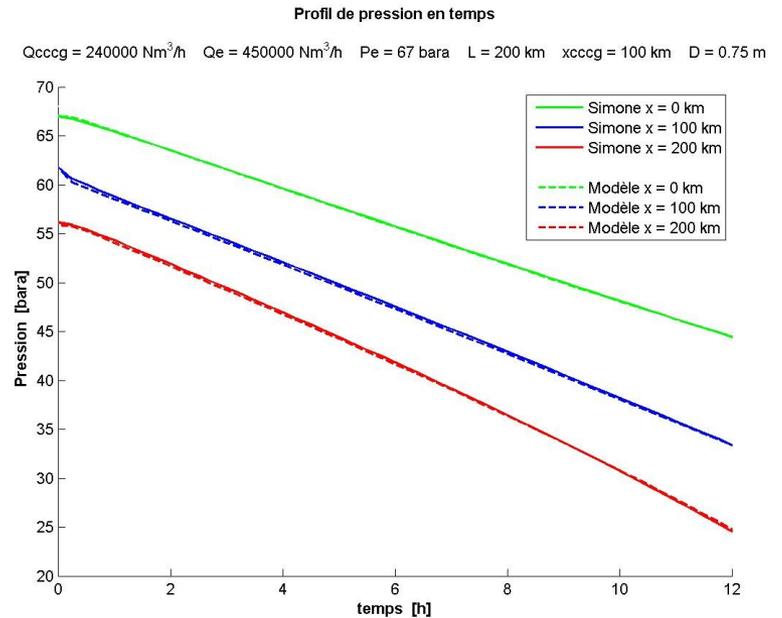
## ■ Introduction

### Présentation succincte

- Jérémy Dalphin, 22 ans
- Année césure aux Mines de Nancy
- Stage de six mois chez GDF SUEZ
- Modélisation de l'impact d'une CCCG

### Déroulement de l'exposé

1. De quoi va-t-on parler ?
2. En quoi consiste la modélisation ?
3. Comment interpréter la solution ?
4. Comment utiliser le modèle ?



Jeudi 1er avril 2010

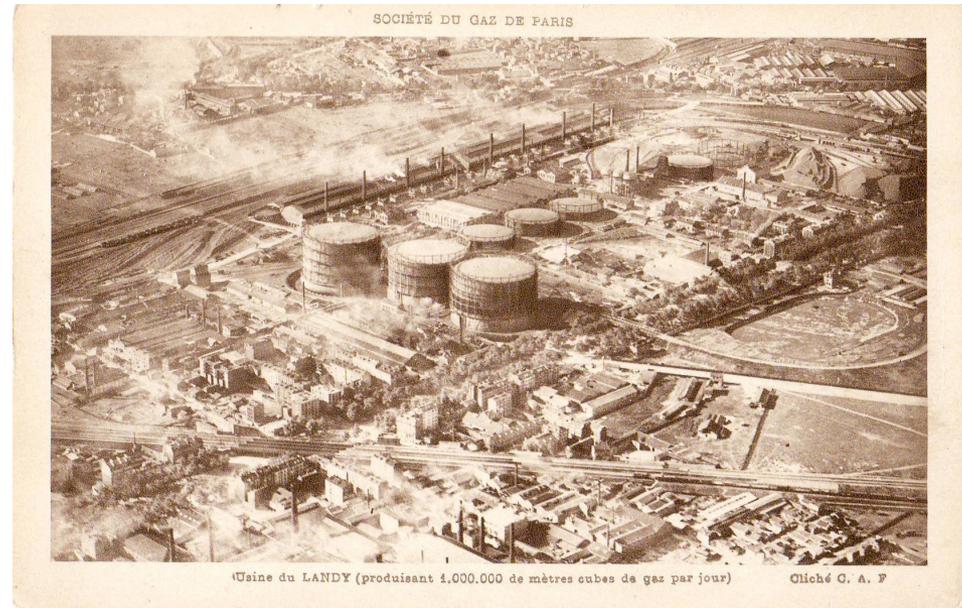
## ■ L'environnement du stage : un pôle de recherche de l'industrie énergétique

### GDF SUEZ, un projet de fusion

- Gaz de France
- Suez

### Le 3<sup>ème</sup> leader mondial de l'énergie

- 1<sup>er</sup> acheteur de gaz en Europe
- Leader mondial du Gaz Naturel Liquéfié
- 1<sup>er</sup> opérateur européen de réseau de transport et de distribution de gaz
- 2<sup>ème</sup> opérateur européen de stockage de gaz et de terminaux méthaniers
- Leader européen des services multi-énergies



## ■ L'environnement du stage : un pôle de recherche de l'industrie énergétique

### **Un groupe intégré sur l'ensemble de la chaîne énergétique**

- Production
- Transport
- Distribution
- Commercialisation

### **Objectifs : répondre aux enjeux du secteur de l'énergie**

- ✓ Sécurité de l'approvisionnement
- ✓ Libéralisation des marchés
- ✓ Convergence gaz / électricité
- ✓ Promotion des énergies propres

## ■ L'environnement du stage : un pôle de recherche de l'industrie énergétique

### Une forte composante recherche

- Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI)

### Une recherche centralisée

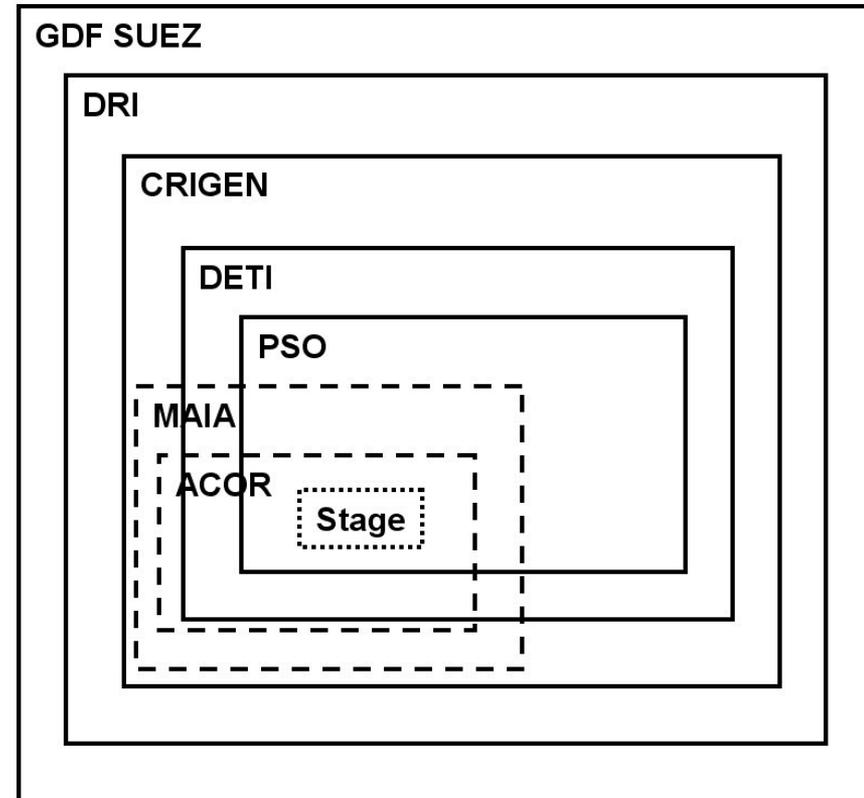
- Centre de Recherche et Innovation Gaz et Energies Nouvelles (CRIGEN)

### Structure verticale

- Département Economie et Traitement de l'Information (DETI)
- Pôle Simulation et Optimisation (PSO)

### Structure horizontale

- Macro-projet Management des Actifs et des Infrastructures (MAIA)
- Projet Aide à la Conduite du réseau (ACOR)



## ■ Contexte du stage : un réseau de transport de gaz à exploiter

### Trois niveaux de hiérarchisation

1. Réseau principal maillé
2. Réseau secondaire arborescent
3. Réseau de distribution

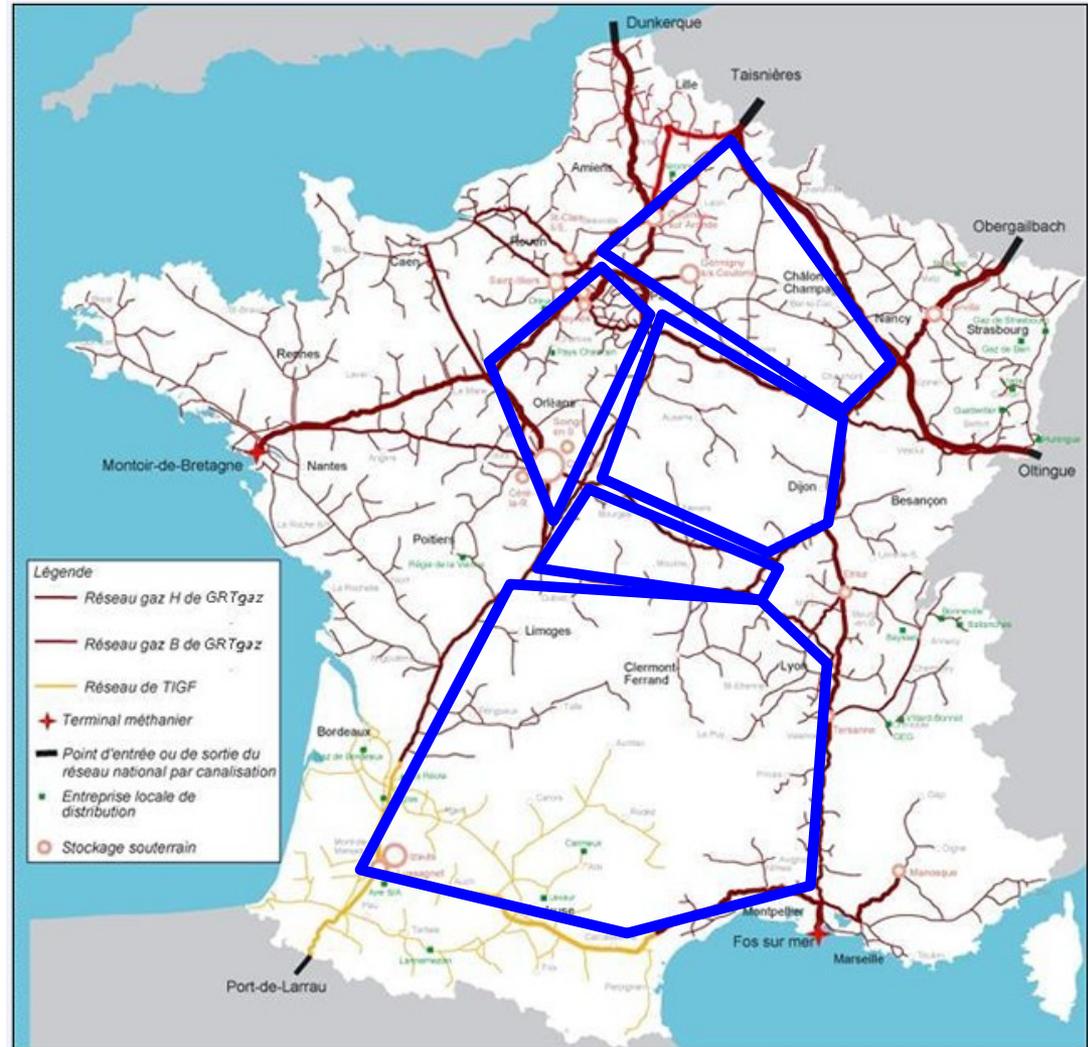


Jeudi 1er avril 2010

## ■ Contexte du stage : un réseau de transport de gaz à exploiter

Trois niveaux de hiérarchisation

1. Réseau principal maillé
2. Réseau secondaire arborescent
3. Réseau de distribution

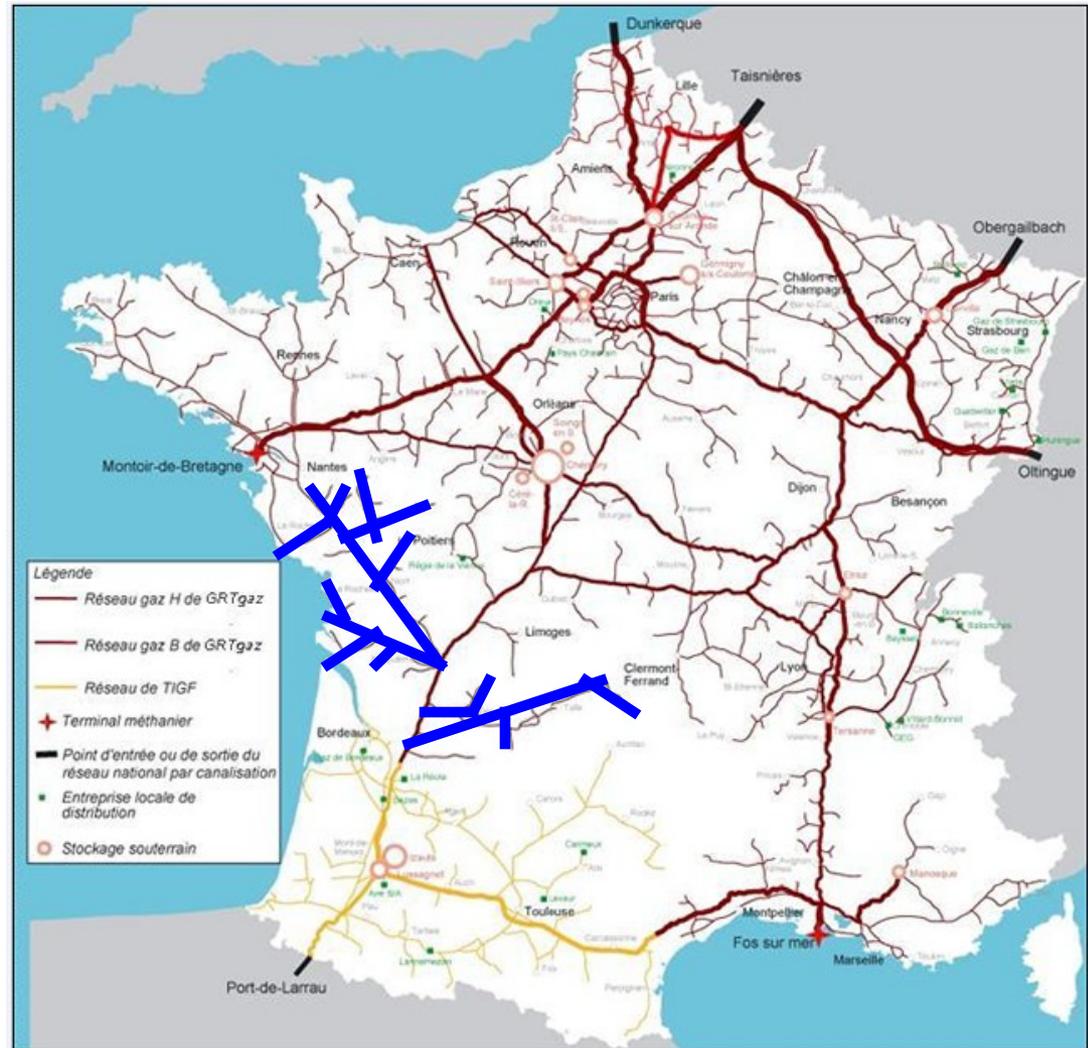


Jeudi 1er avril 2010

## ■ Contexte du stage : un réseau de transport de gaz à exploiter

### Trois niveaux de hiérarchisation

1. Réseau principal maillé
2. Réseau secondaire arborescent
3. Réseau de distribution



Jeudi 1er avril 2010

## ■ Contexte du stage : un réseau de transport de gaz à exploiter

### Trois niveaux de hiérarchisation

1. Réseau principal maillé
2. Réseau secondaire arborescent
3. Réseau de distribution

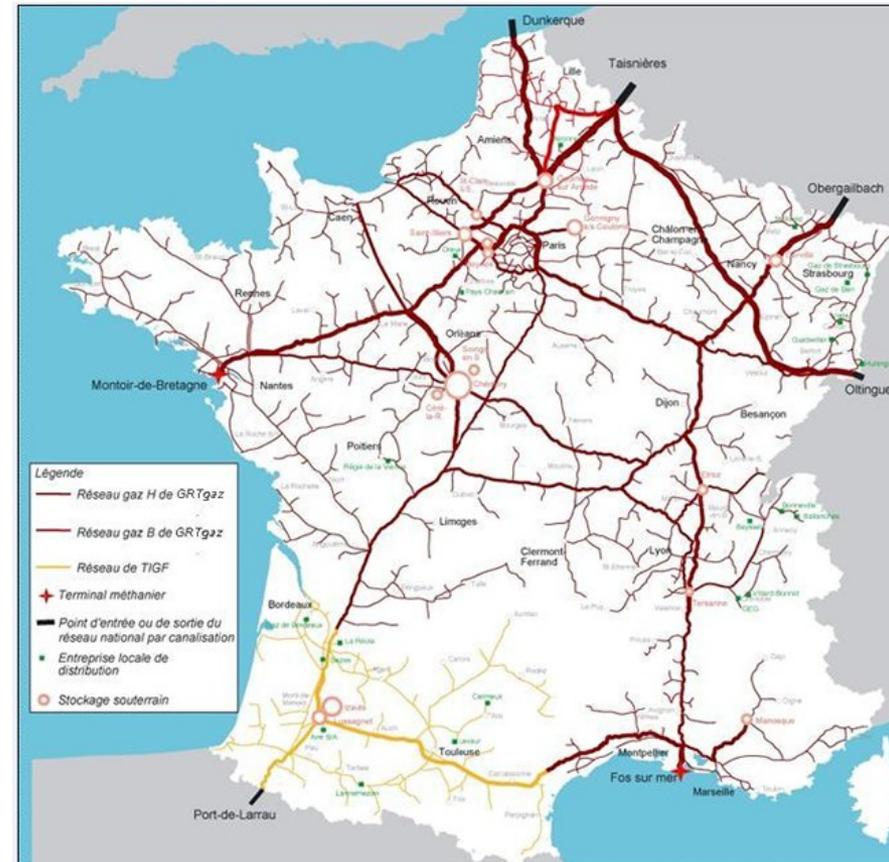


Jeudi 1er avril 2010

## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### La mission de GRTgaz\_

- Gestionnaire du réseau de gaz naturel français
- Equité et transparence de l'accès au réseau
- Ventes de capacités au expéditeurs
- Assurer un acheminement effectif et sécurisé du gaz aux expéditeurs



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

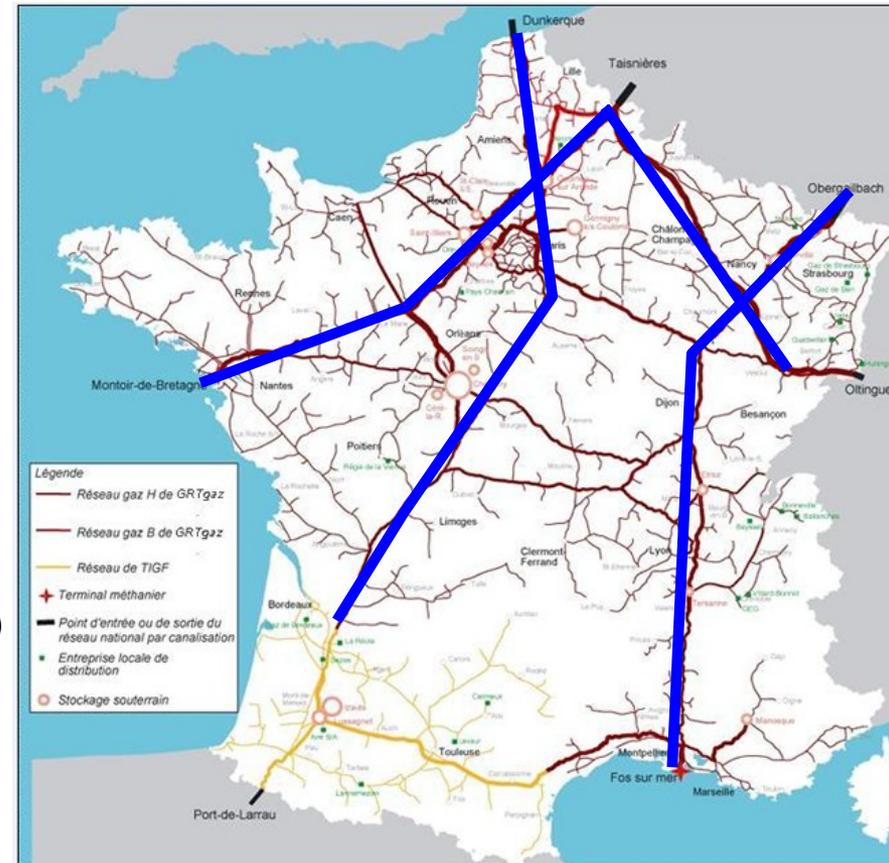
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

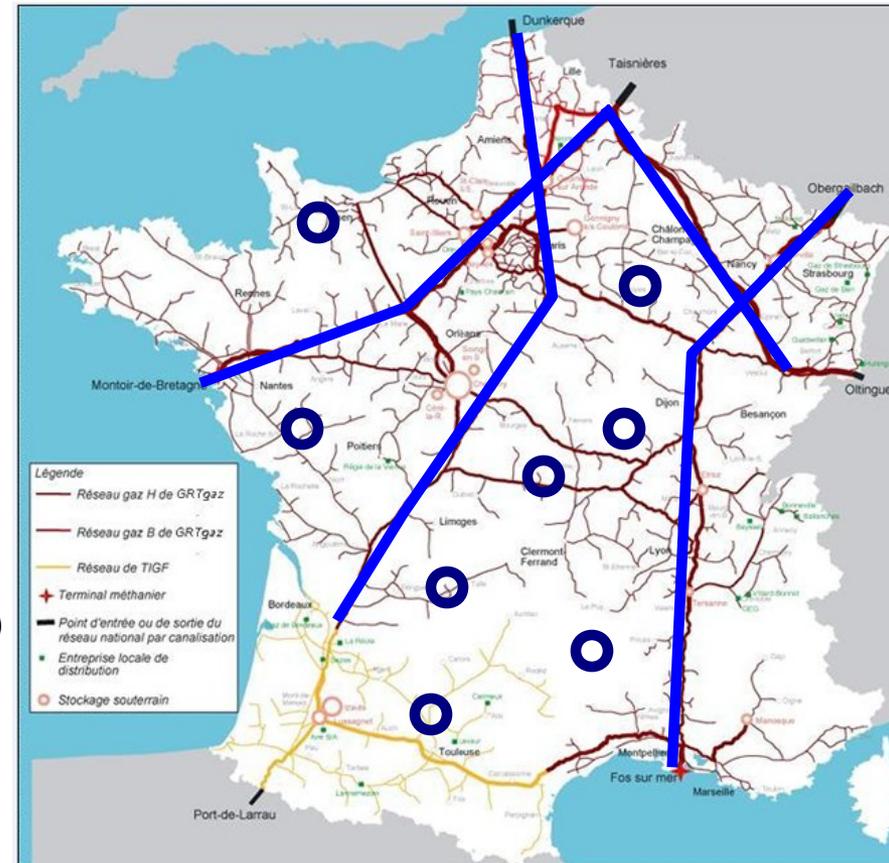
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

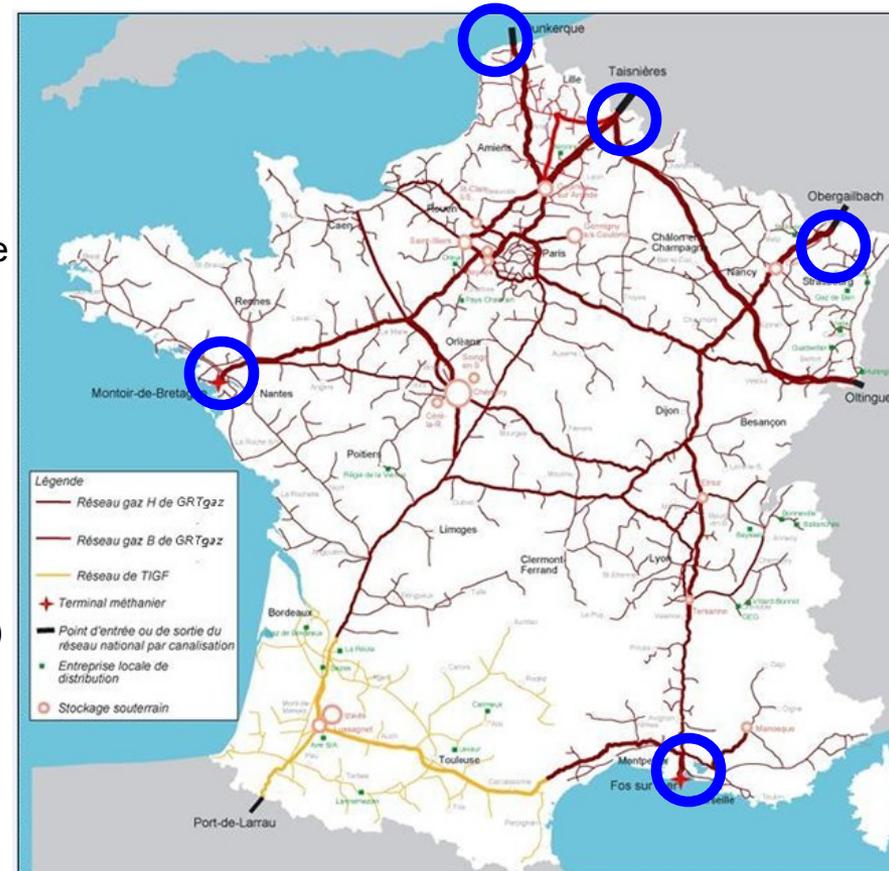
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

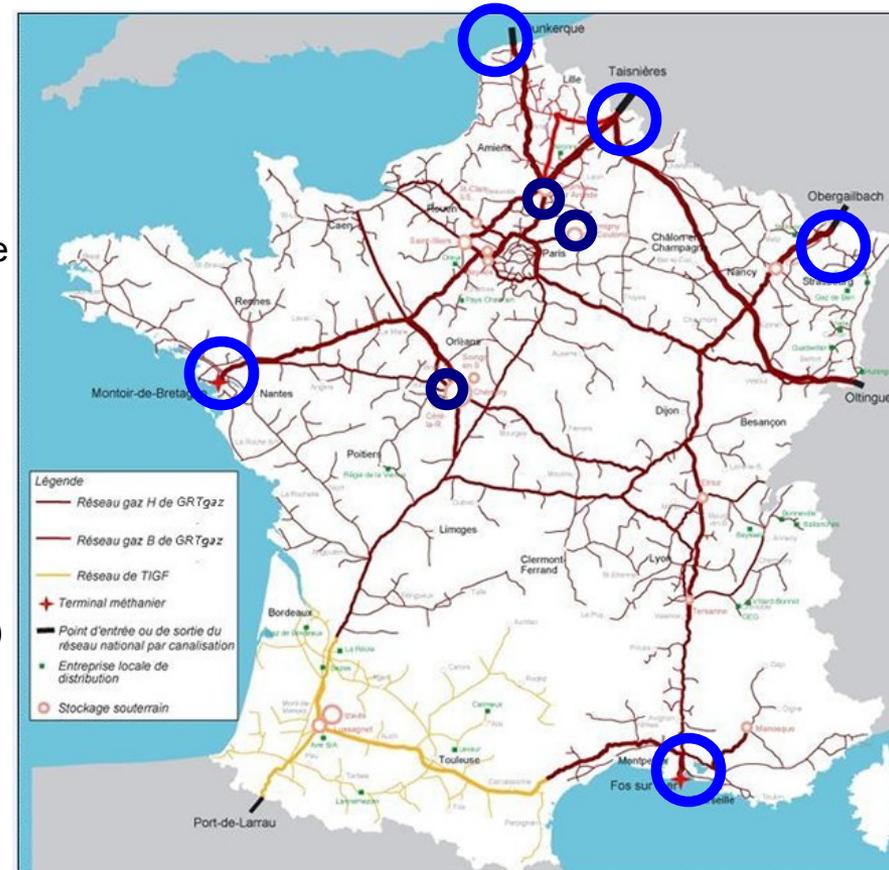
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- **Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz**
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

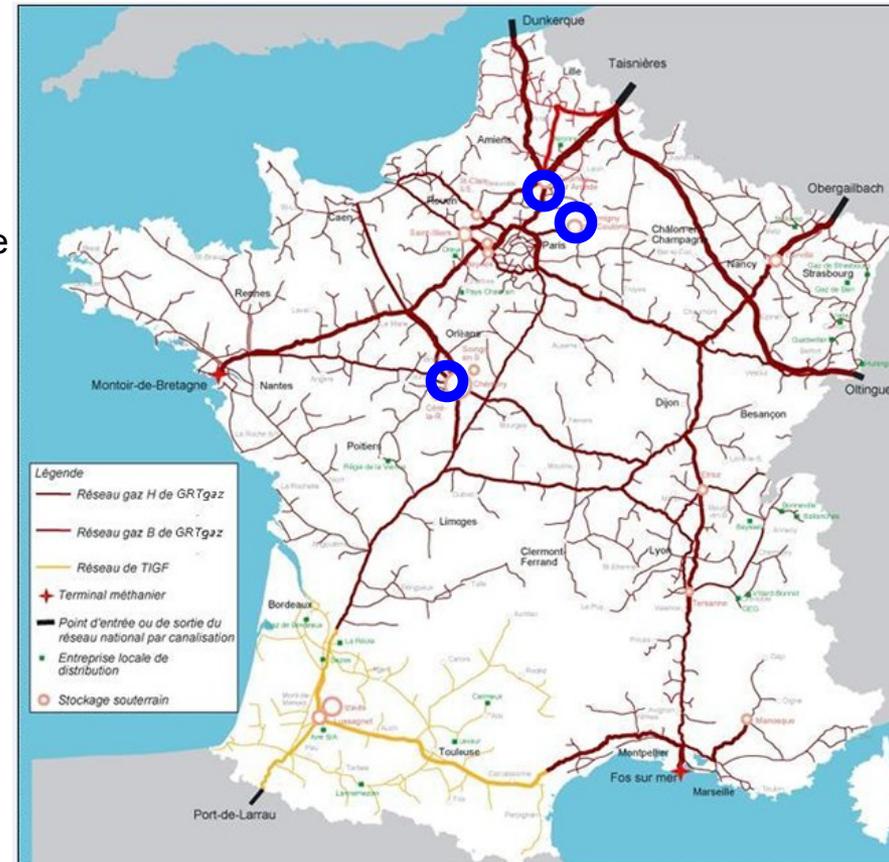
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- **Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz**
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

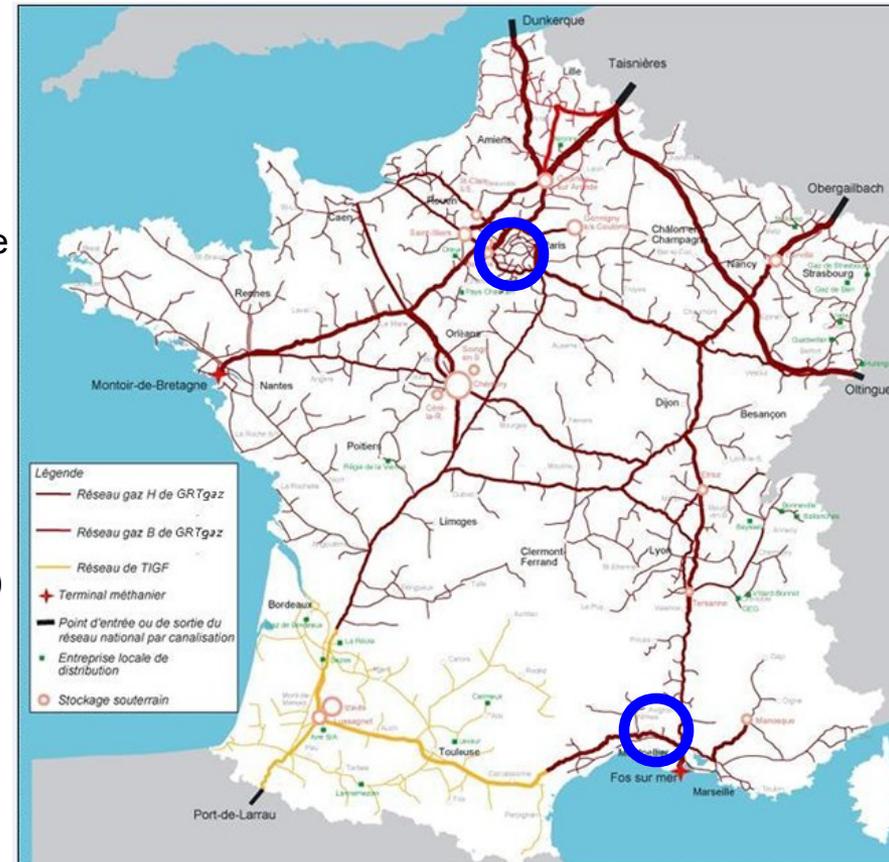
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz
- **Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser**
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte de stage : le client GRTgaz, filiale de GDF SUEZ

### Les contraintes d'exploitation du réseau

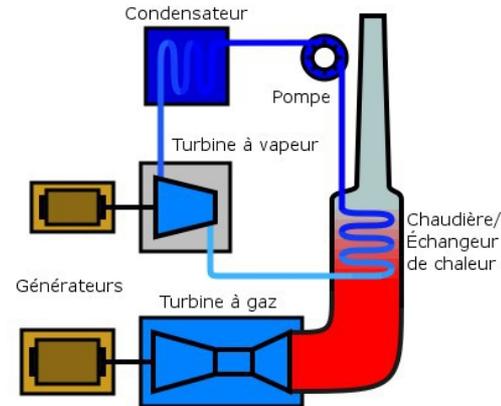
- Les chutes de pression dues aux pertes de charges et aux prélèvements du gaz en conduite
- Les débits d'entrée et de sortie ainsi qu'une partie des stockages non maîtrisés par GRTgaz
- Outils d'exploitation (stockage, stations, vannes) dont le coût est à minimiser
- Démarrage peu prévisible de nouveaux ouvrages : CCCG



## ■ Contexte du stage : les Centrales à Cycles Combinés Gaz (CCCG), génératrices de nouvelles contraintes

### Les avantages d'une CCCG

- Peu polluant
- Bon rendement
- Relie les réseaux gaz / électricité



### Une implantation des CCCG

- Massive
- Récente
- Non maîtrisée

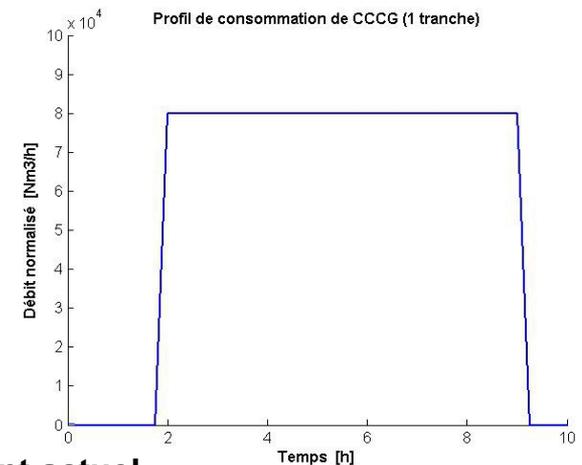
## ■ Contexte du stage : les Centrales à Cycles Combinés Gaz (CCCG), génératrices de nouvelles contraintes

### Études d'appui effectuées en régime permanent

- Consommateurs constamment connectés au réseau
- Besoins prévisibles et progressifs
- Faibles écarts autour d'une moyenne stable
- Régime variable = gestion de la respiration du réseau (expérience terrain)

### NEW : Un profil intrinsèquement dynamique

- Consommation brusque
- Consommation importante
- Ne peut être inclus dans une respiration normale du réseau



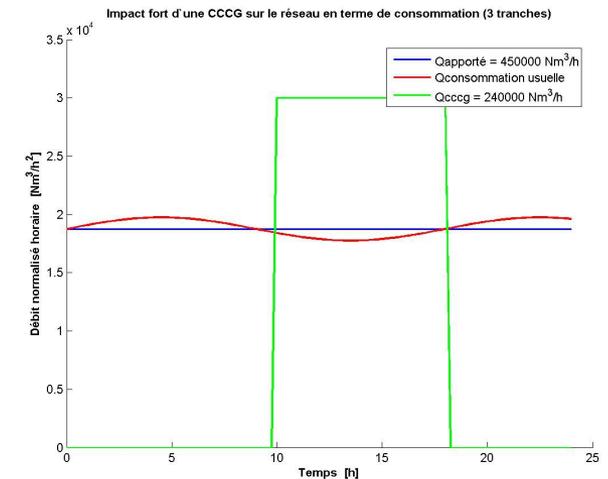
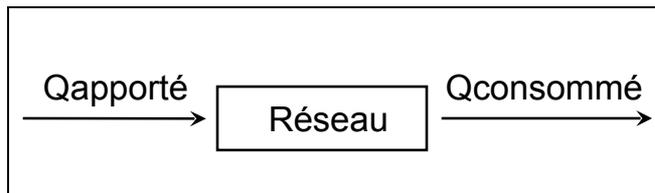
**Remise en cause de la suffisance du mode de fonctionnement actuel**

## ■ Contexte du stage : les Centrales à Cycles Combinés Gaz (CCCG), génératrices de nouvelles contraintes

**Implantation massive + Régime fortement variable = Impact fort sur le réseau**

□ Apparition de pics et de creux de consommation partout sur le réseau

□ Des apports répartis sur 24h alors que consommés en 8h



□ Une utilisation plus systématique des stockages et du stock en conduite

**Conclusion : un besoin rapide de connaître l'impact des CCCG sur le réseau**

## ■ Contexte du stage : vers une prise en compte plus forte des régimes variables

### **Solutions envisagées pour exploiter le réseau par GRTgaz**

- Imposer des délais de préavis plus long
- Pilotage du réseau en temps réel (vannes, stockages, capteurs)
- Sur-dimensionner le réseau

### **Un besoin croissant de compréhension des phénomènes dynamiques sous-jacents**

### **Solutions que peut proposer MAIA pour aider GRTgaz**

- Études de cas
- Simulation intensive
- Modélisation

## ■ Sujet de stage : modéliser l'évolution de la pression dans une artère suite au démarrage d'une CCCG.

### 1. Défricher le sujet

- Bien poser le problème, le délimiter et le comprendre
- Travail bibliographique afin d'établir un état de l'art
- Obtention des équations d'évolution usuelles

### 2. Modélisation dynamique d'une consommation forte et brusque

- Obtenir une formule explicite
- Valider le modèle grâce à la simulation

### 3. Exploitation du modèle

- Ordres de grandeur concernant l'impact des paramètres sur la perte/gain de pression.
- Propriétés de la solution
- Calcul du temps de dépassement de la pression minimale
- Calcul du temps de démarrage d'un stockage pour stabiliser la pression.

## ■ Présentation de la modélisation : définir le système

- **Système étudié** : du gaz naturel

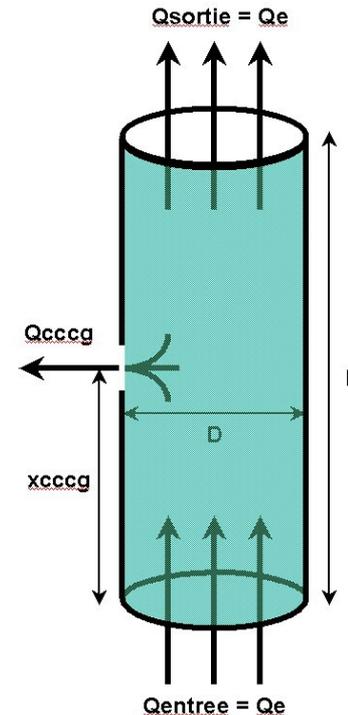
Grandeur	Notation	Ordre de grandeur
Masse molaire	$M$	17 g.mol <sup>-1</sup>
Pouvoir calorifique supérieur normalisé	$PCS_N$	11.4 kWh.Nm <sup>-3</sup>
Température	$T$	12 °C
Densité normalisée	$d_N$	0.6

- **Dynamique du système** : un fluide en mouvement

Grandeur	Notation	Intervalle de variation	Ordre de grandeur
Pression	$P$	40 – 80 bara	60 bara
Débit normalisé	$Q_N$	50 000 – 1 500 000 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	450 000 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Masse volumique	$\rho$	30 – 60 kg.m <sup>-3</sup>	43 kg.m <sup>-3</sup>
Vitesse	$U$	0 – 12 m.s <sup>-1</sup>	3 m.s <sup>-1</sup>

- **Domaine d'étude** : une portion de canalisation

Grandeur	Notation	Ordre de grandeur
Diamètre intérieur	$D$	1 m
Longueur	$L$	100 km
Rugosité apparente	$Ke$	10 μm



## ■ Présentation de la modélisation: définir le système

- **Caractéristique de l'écoulement** : turbulent et adhérent

Grandeur	Notation	Ordre de grandeur
Nombre de Reynolds	$Re$	$10^7$
Coefficient de frottement	$\lambda$	$9 \cdot 10^{-3}$

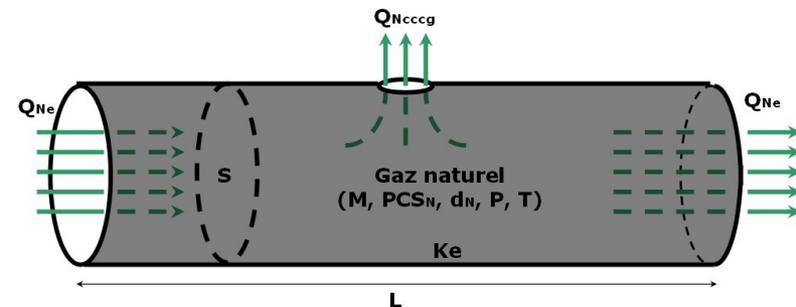
- **Etat initial**: régime permanent sans CCCG

Conservation masse  $\implies Q_N = \text{Cste}$

- **Frontière du système**: entrée, sortie, CCCG

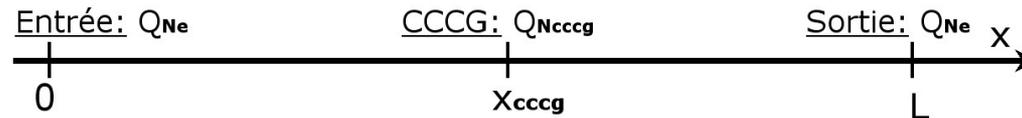
Grandeur	Notation	Ordre de grandeur
Débit d'entrée	$Q_{Ne}$	$450\,000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Débit de la CCCG	$Q_{Ncccg}$	$160\,000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

- **Schéma de la situation** : une canalisation qui se vide



## ■ Hypothèses de la modélisation

- ✓ Écoulement mono-dimensionnel, unidirectionnel et horizontal

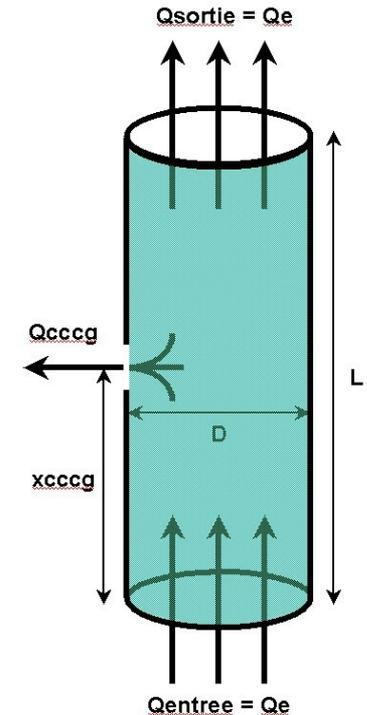


- ✓ Forces d'inertie négligées

Grandeur	Notation	Ordre de grandeur	Valeur
Constante de temps	$\tau_{cana}$	$5 \cdot 10^{-4} \frac{L^2 U}{D}$	15 min
Durée d'un choc	$\tau_{choc}$	$0.02 L$	2 min

- ✓ Écoulement isotherme

Grandeur	Notation	Ordre de grandeur
Constante de temps	$\tau_{cana}$	15 min
Durée associée à la température	$\tau_{temp}$	24 h



## ■ Adaptation des équations d'évolution

- Équation d'état du gaz réel

$$P = \underbrace{1 - \frac{\delta P}{Z}} \frac{\rho RT}{M}$$

- Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{2P}{Z} \frac{\partial P}{\partial x} = -\alpha Q_N^2$$

- Conservation de la masse

$$\frac{\partial}{\partial t} \underbrace{\left( \frac{P}{Z} \right)}_{\sim \rho} + \beta \frac{\partial Q}{\partial x} = -\beta Q_{cccg} \delta_{cccg}(x)$$

- Découplage du système

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{Z} \right) + \frac{\beta}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{\frac{-2P}{Z} \frac{\partial P}{\partial x}} \right) = -\beta Q_N cccg \delta_{cccg}(x)$$

- Facteur de compressibilité

Notation	Ordre de grandeur	Valeur
Z	$1 - 2 \cdot 10^{-3} P$	0.9

- Paramètre d'espace

Notation	Ordre de grandeur	Valeur
$\alpha$	$9 \cdot 10^{-12} \frac{1}{D^5}$	$10 \cdot 10^{-12} \text{ bara}^2 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Nm}^{-6} \cdot \text{h}^2$

AN: D=1m, L=100 km, Q=10 000 000 Nm<sup>3</sup>/h => chute 9 bara<sup>2</sup>/km

- Paramètre de temps

Notation	Ordre de grandeur	Valeur
$\beta$	$1.35 \cdot 10^{-3} \frac{1}{D^2}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ bara} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot \text{h} \cdot \text{km}$

AN: D=1m, dQ/dx=1 000 Nm<sup>3</sup>/h/km => chute 1 bara/h

## ■ Simplification de l'équation d'évolution de la pression

- Linéarisation la dérivée spatiale autour de l'état initial

$$\frac{1}{Z^2} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\beta}{2\alpha Q_{Ne}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2P}{Z} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = -\beta Q_{Ncccg} \delta_{cccg}(x)$$

- Indépendance spatiale du facteur de compressibilité

$$\frac{1}{Z_m^2(t)} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\beta}{2\alpha Q_{Ne} Z_m(t)} \frac{\partial^2 (P^2)}{\partial x^2} = -\beta Q_{Ncccg} \delta_{cccg}(x)$$

- Choix de la variable de travail  $P^2$

$$\frac{\partial (P^2)}{\partial t} - \gamma(t) \frac{\partial (P^2)}{\partial x} = -S_{cccg} \gamma(t) \delta_{cccg}(x)$$

- Obtention d'une équation de la chaleur

Paramètre de l'équation	Notation	Expression
Coefficient de diffusion	$\gamma(t)$	$\frac{\beta P_m(t) Z_m(t)}{\alpha Q_{Ne}}$
Terme source	$S_{cccg}$	$2Z_m(0) \alpha Q_{Ne} Q_{Ncccg}$
Pression moyenne	$P_m(t)$	$\frac{P_m(0) - \frac{Z_m(0) \beta Q_{Ncccg} t}{L}}{1 - \delta \frac{Z_m(0) \beta Q_{Ncccg} t}{L}}$

## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

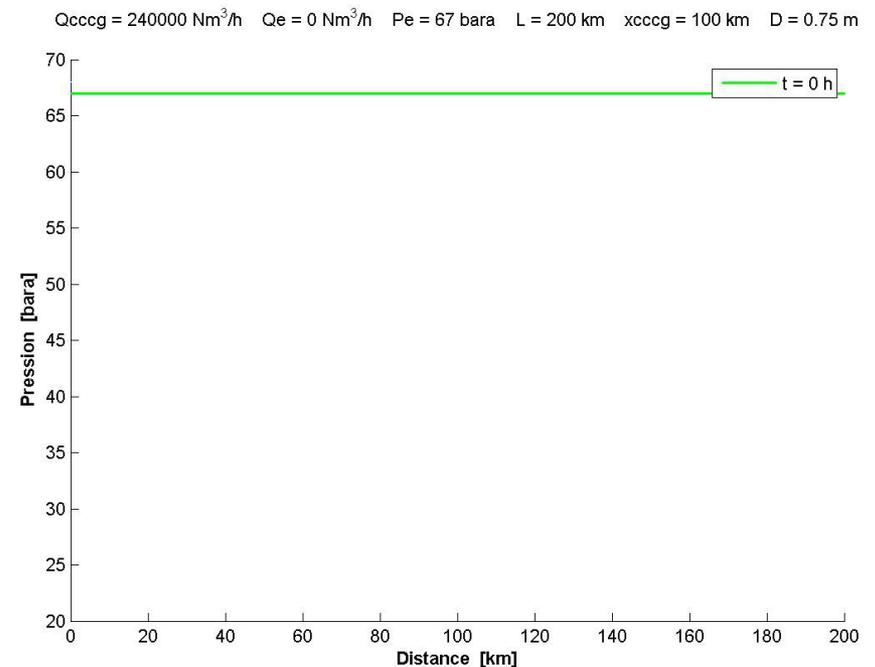
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

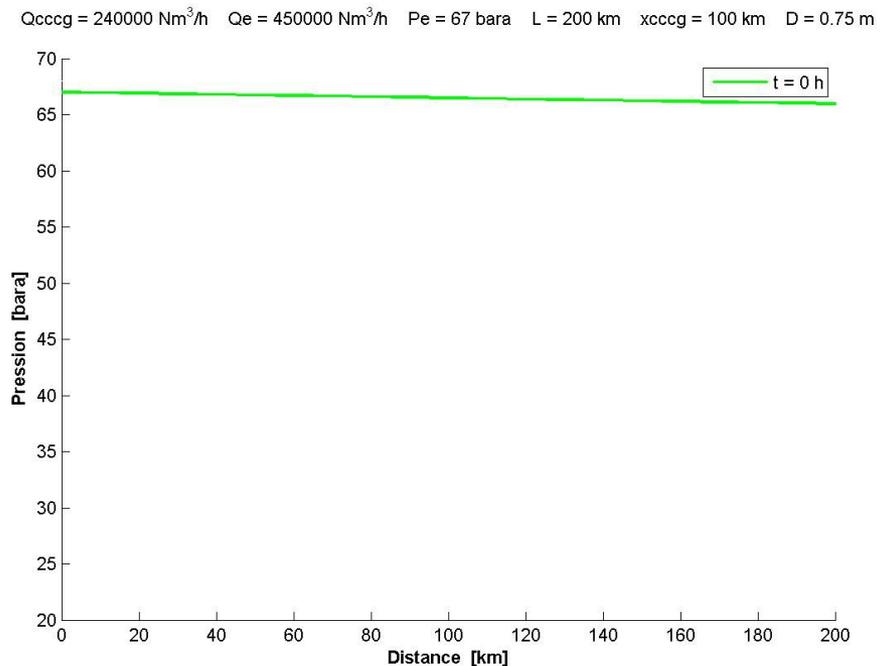
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

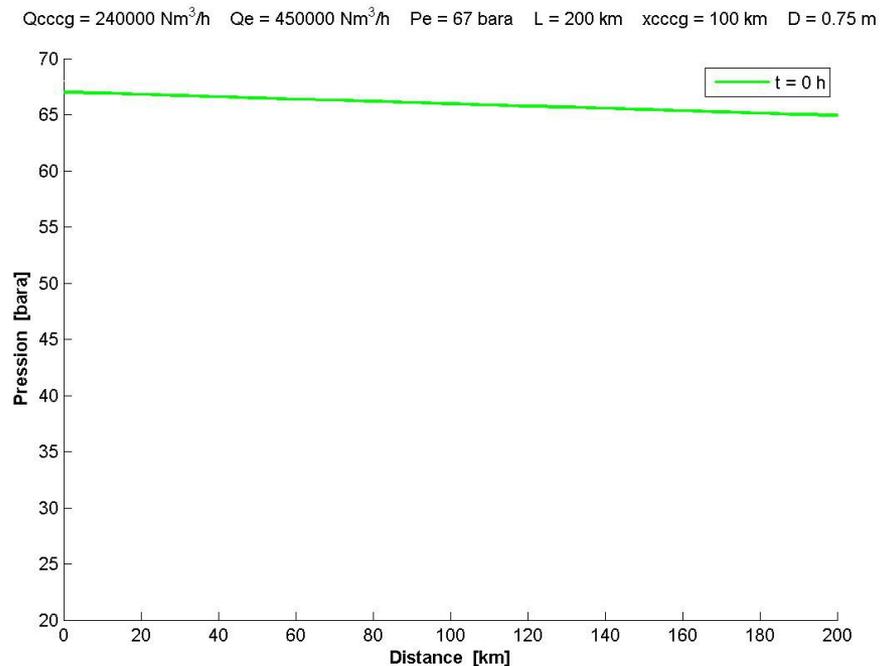
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

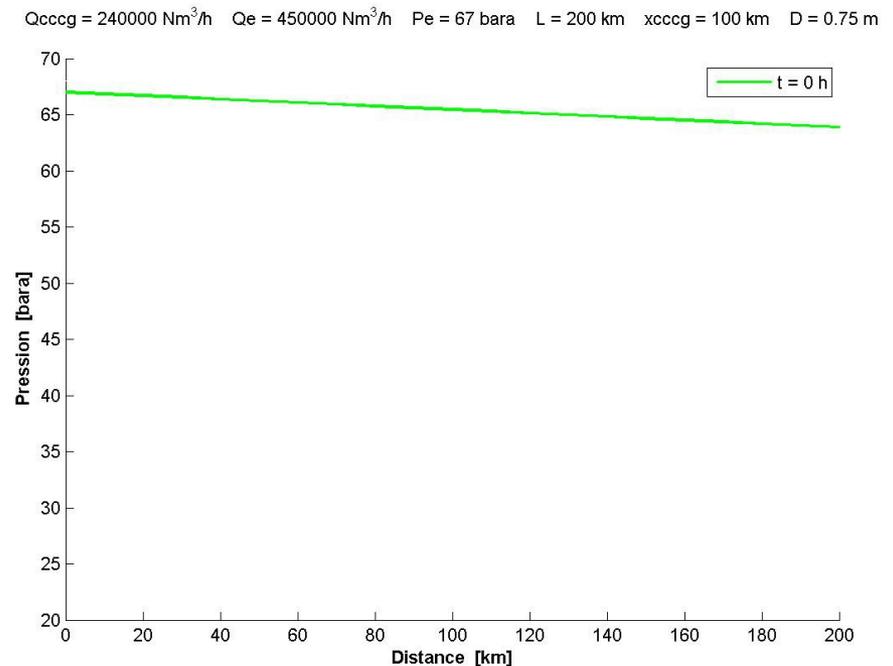
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

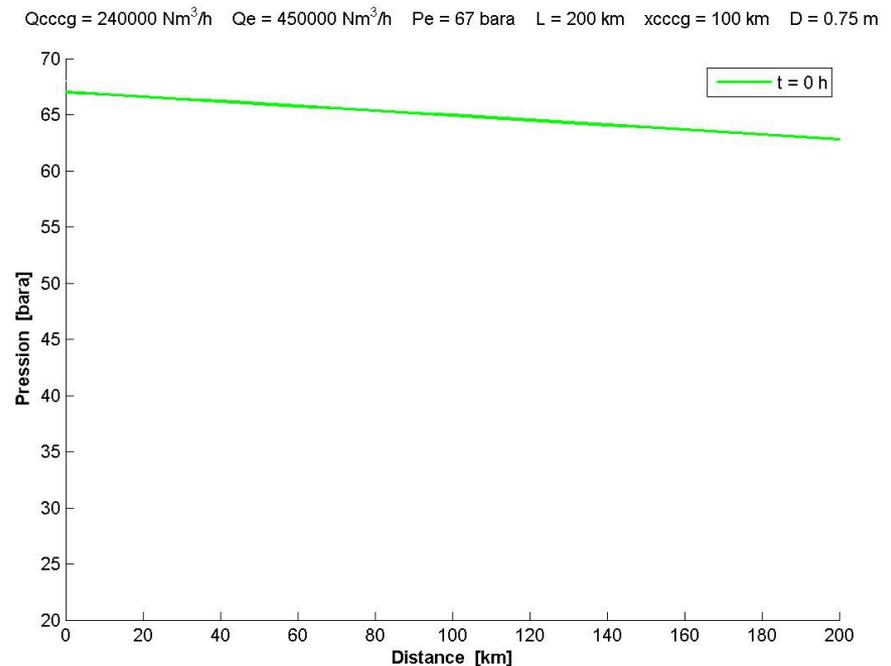
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

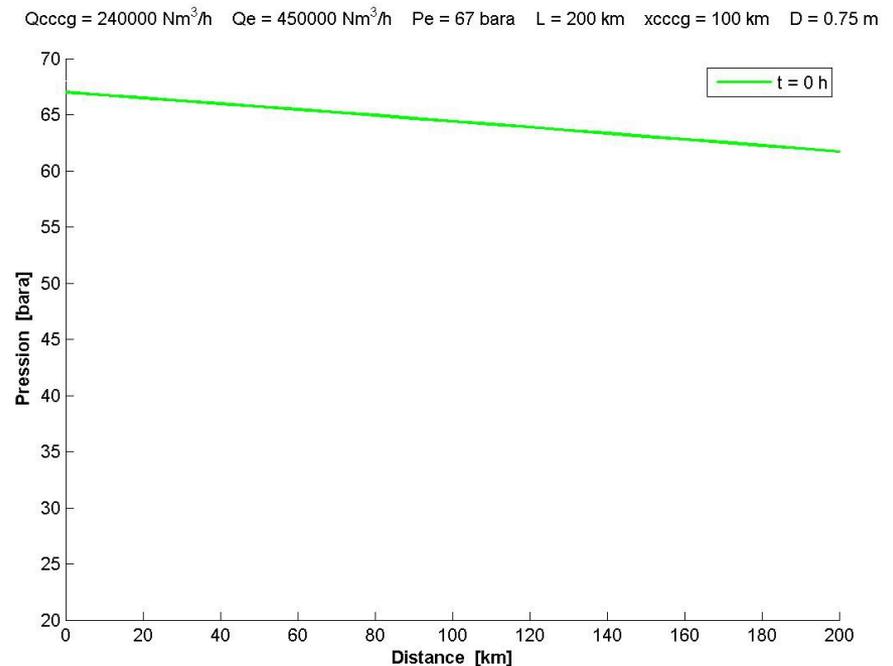
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

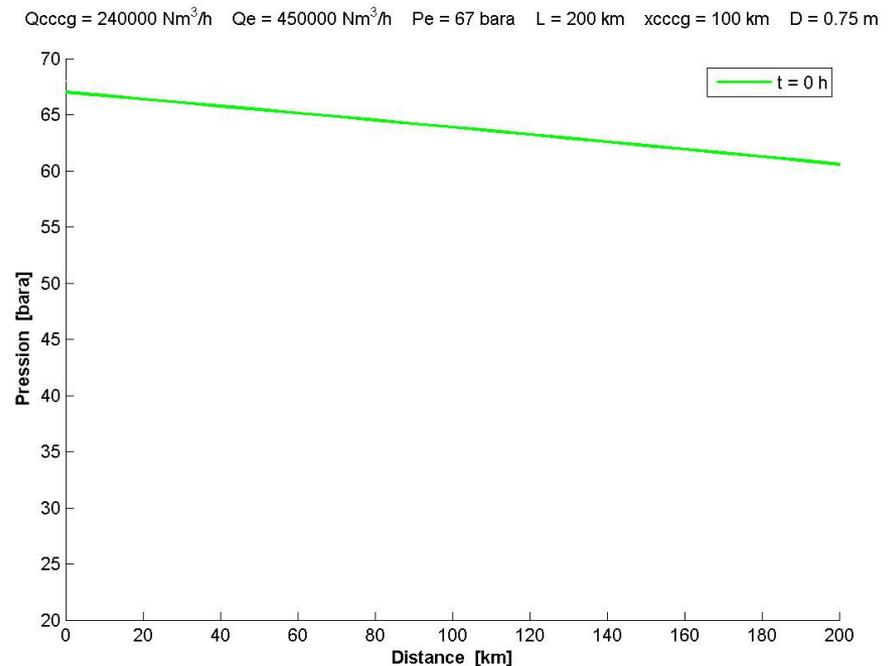
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

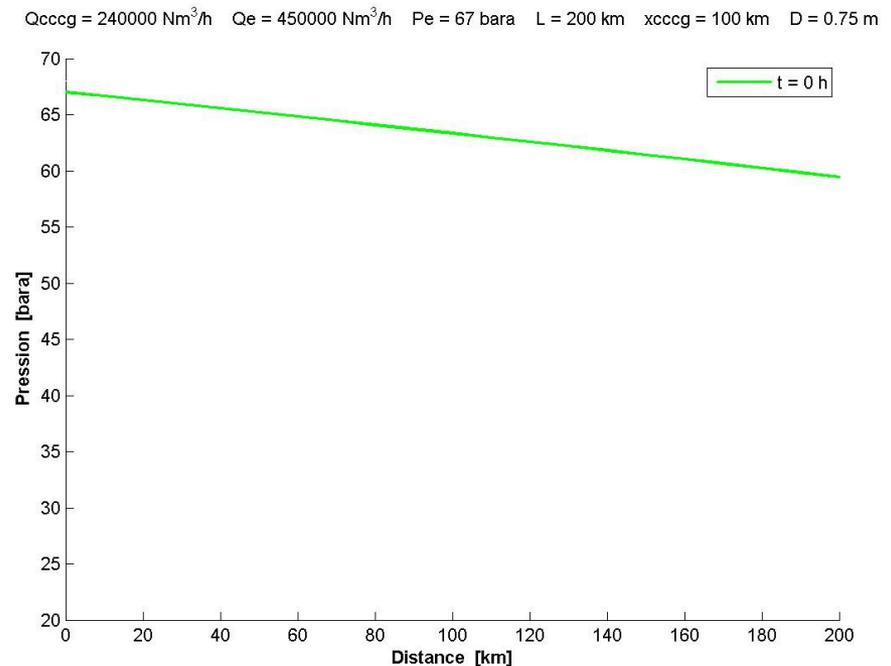
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

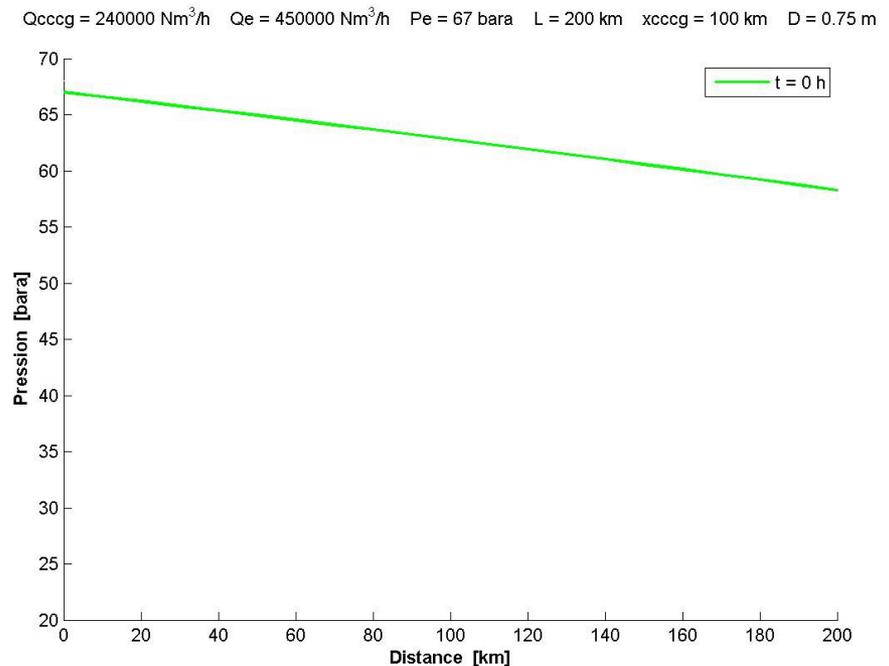
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

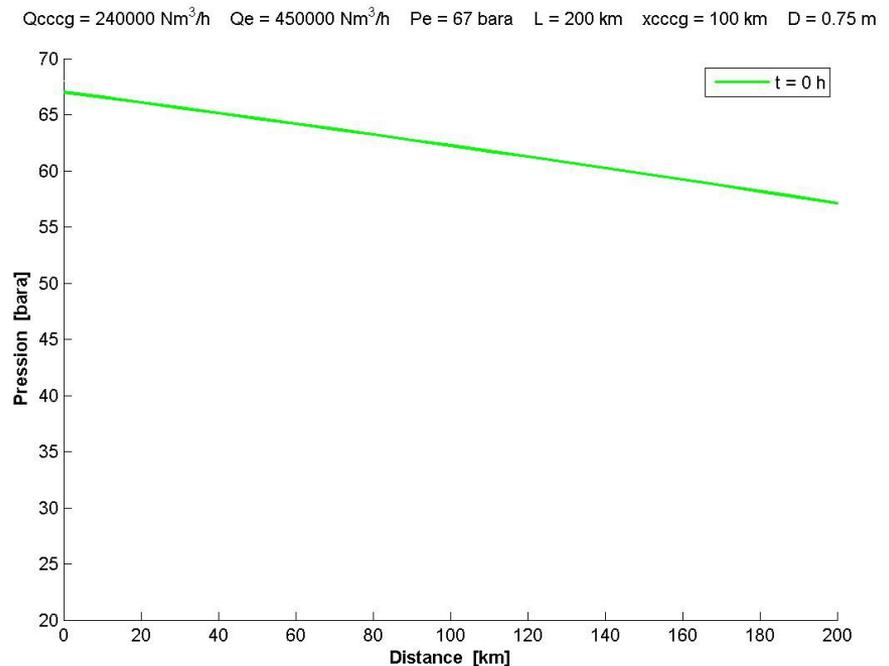
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

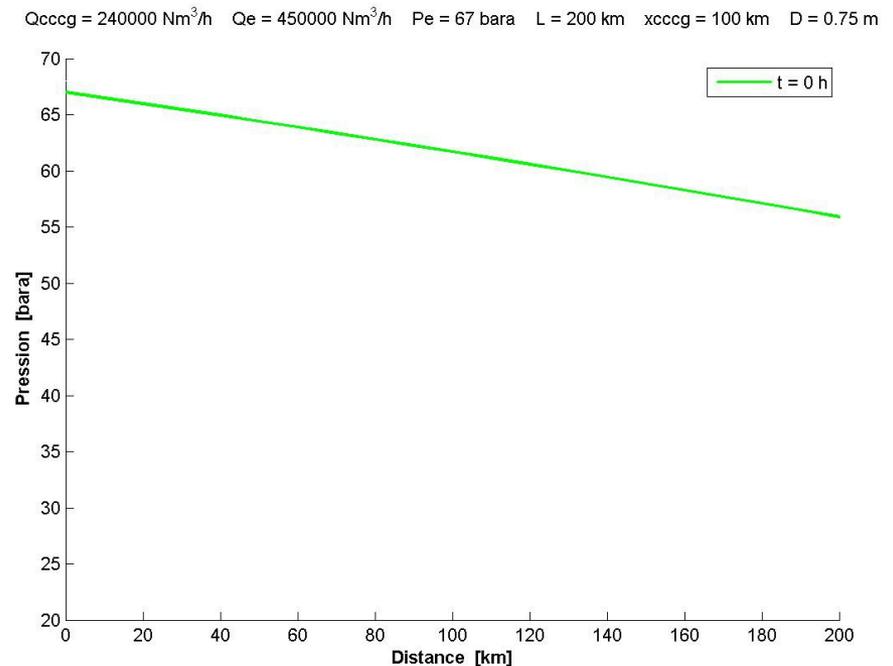
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

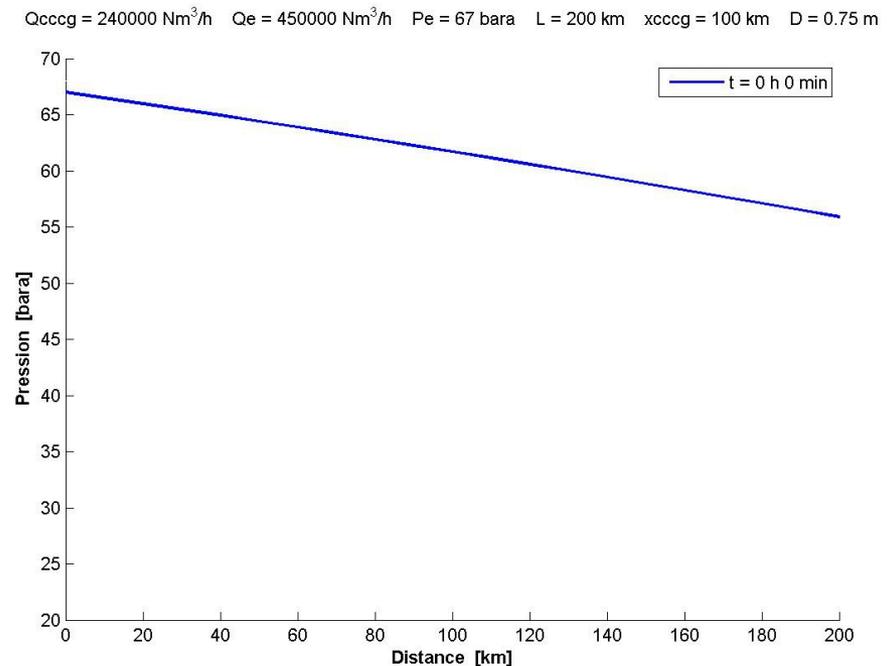
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

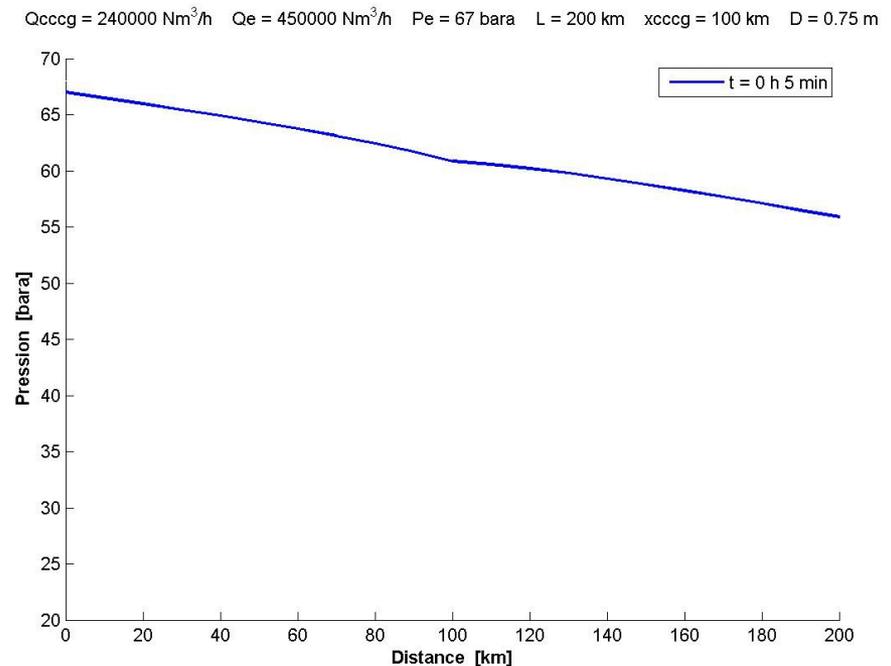
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

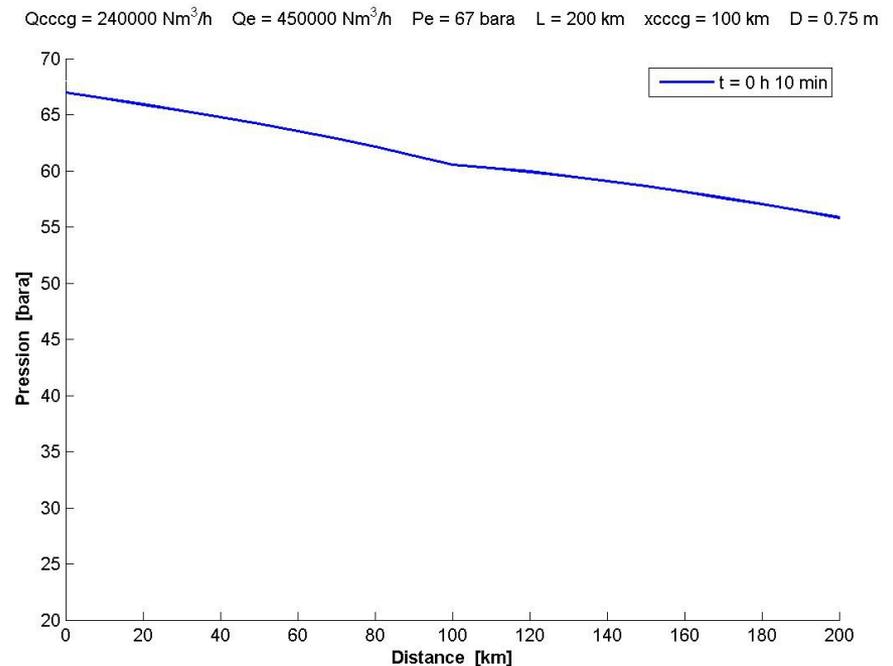
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

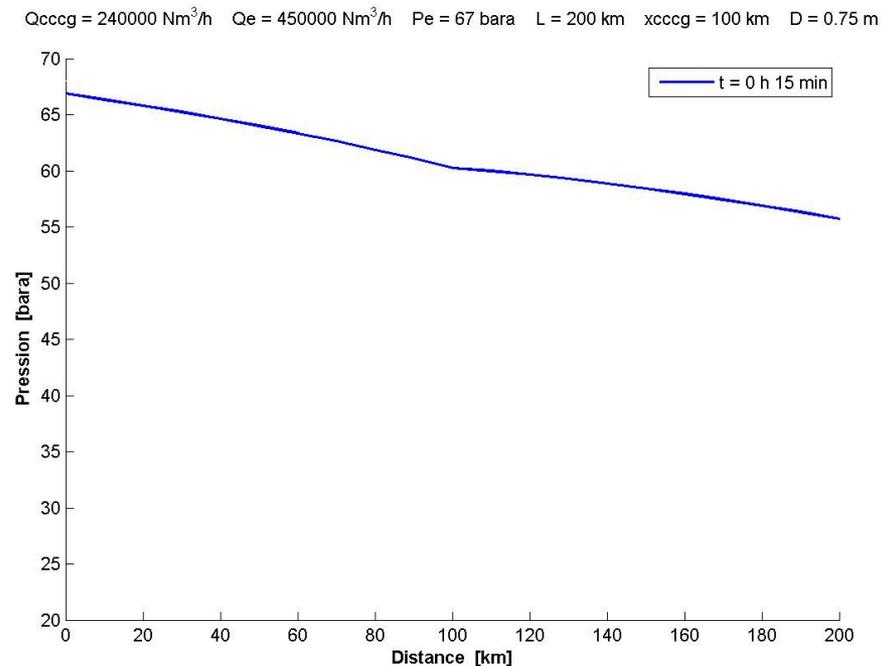
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

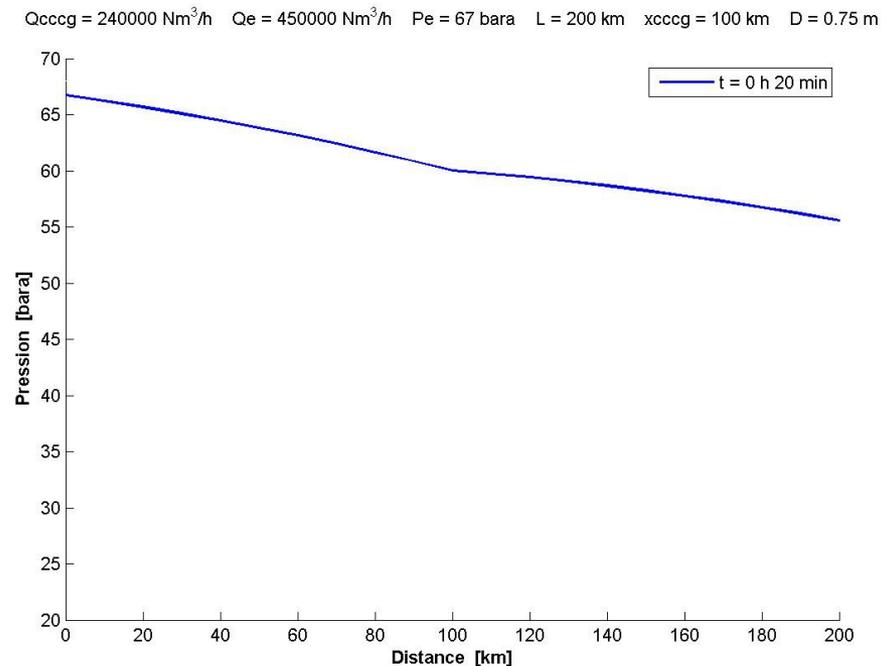
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

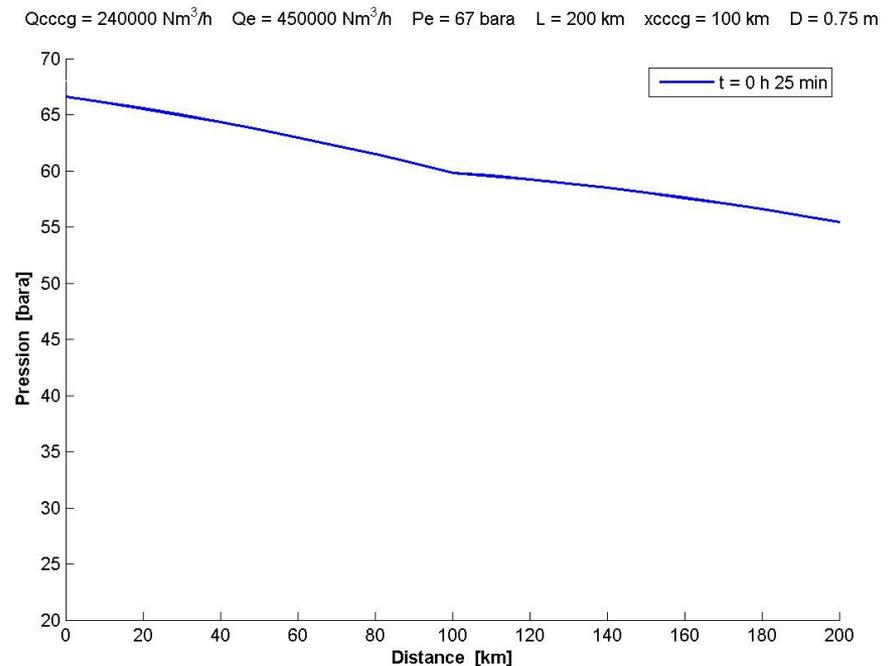
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

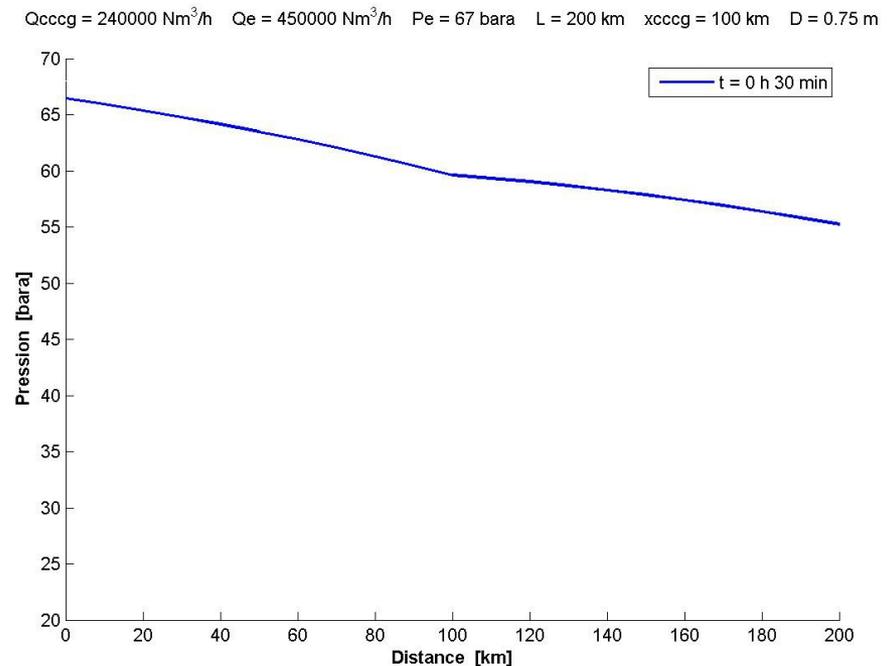
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

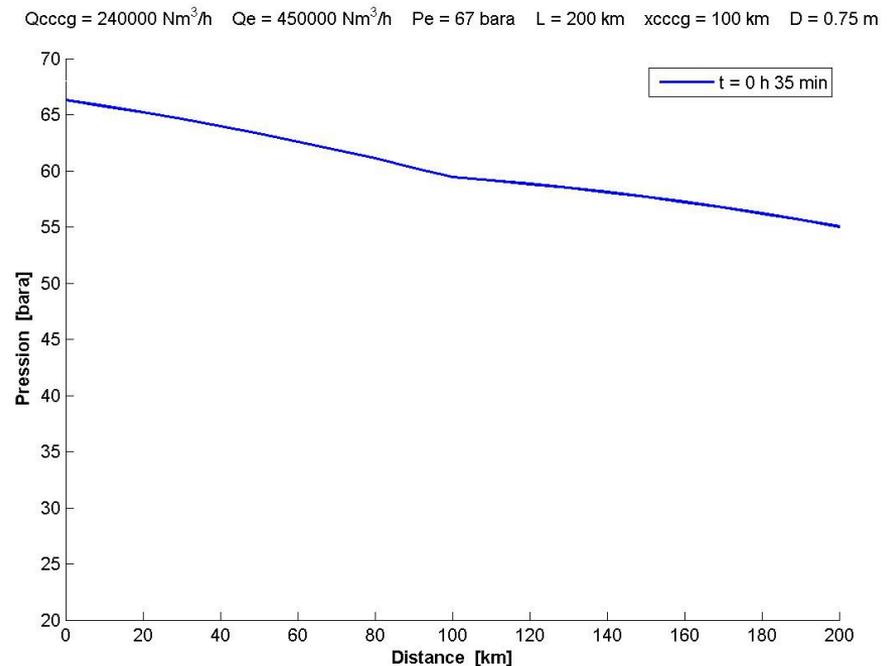
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

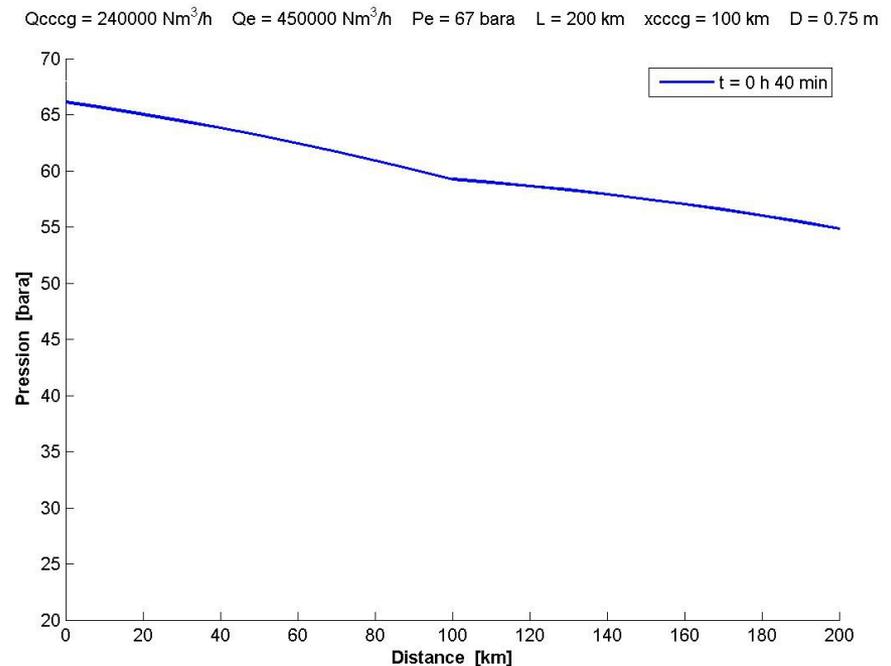
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

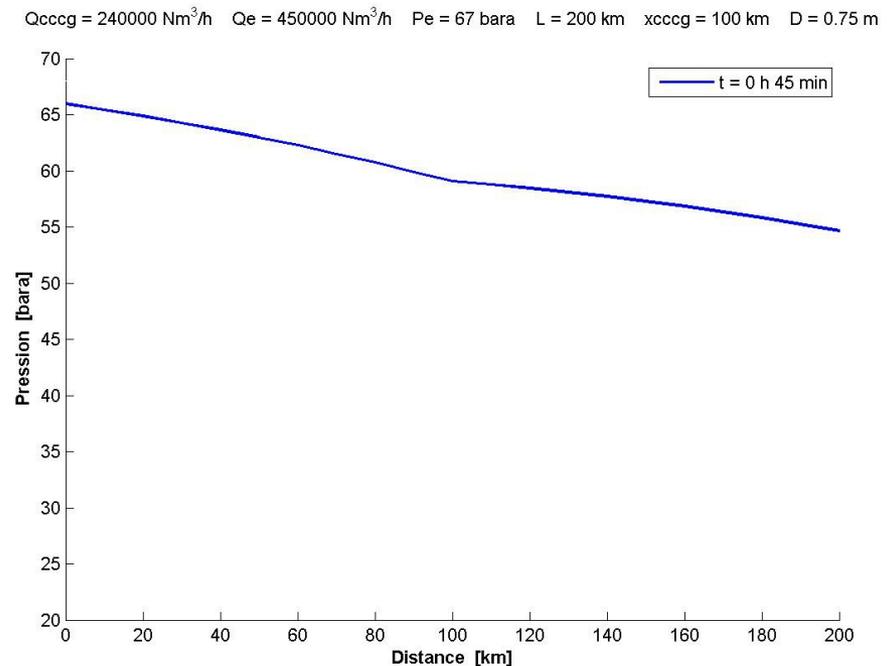
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

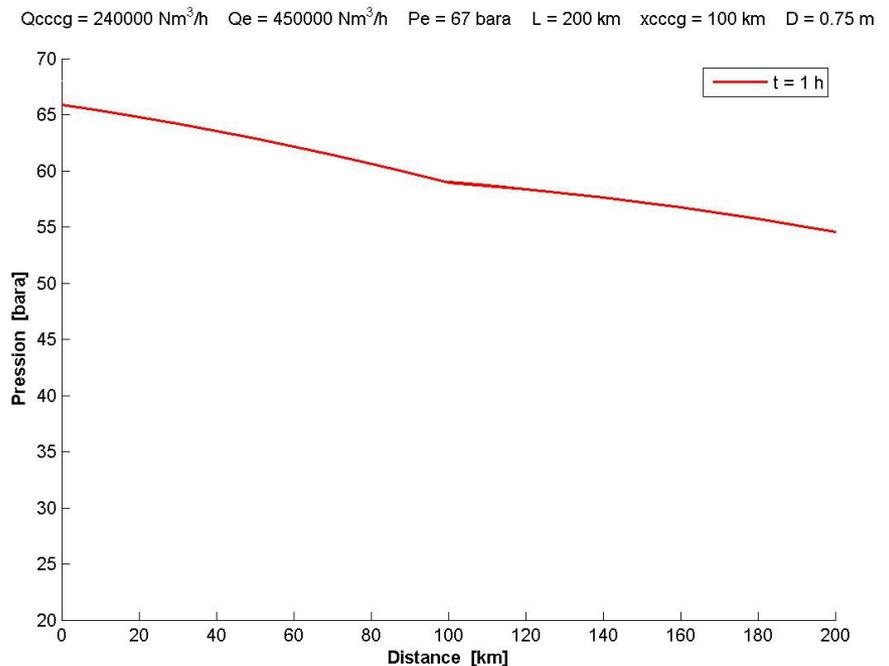
### État initial

1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

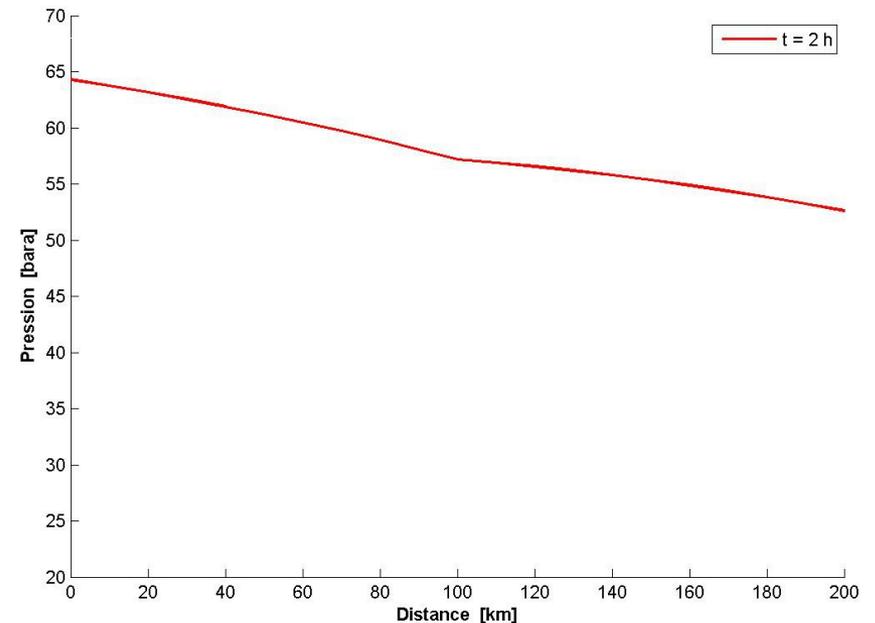
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

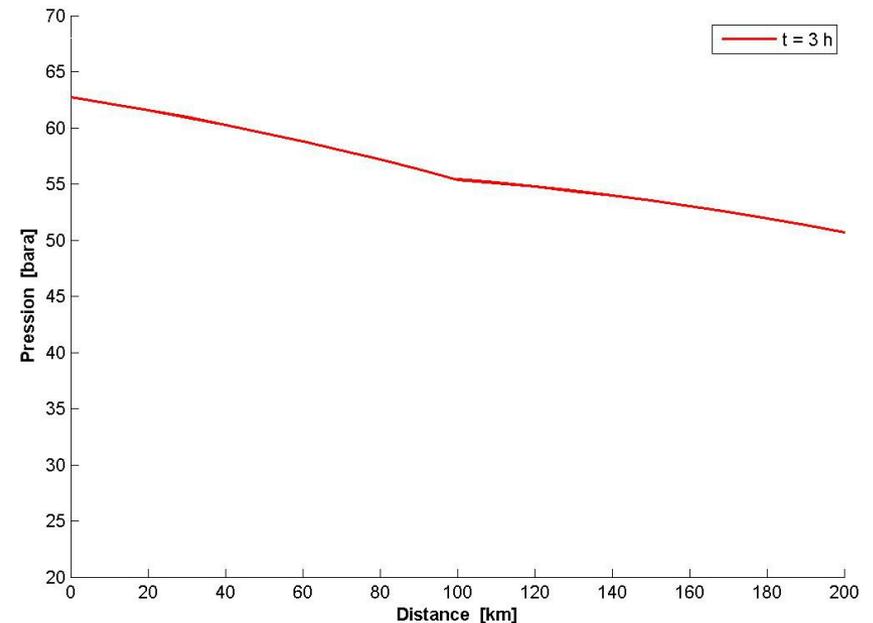
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

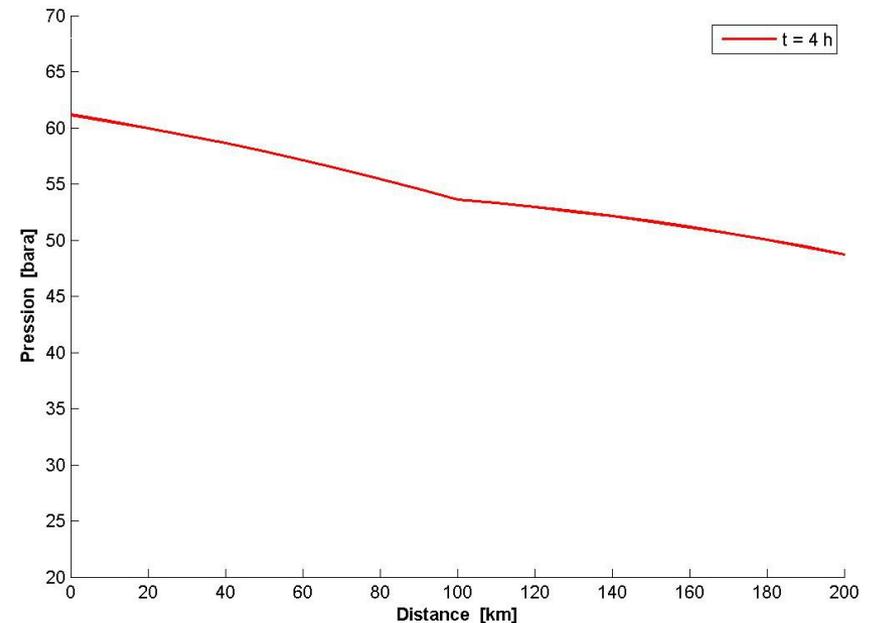
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

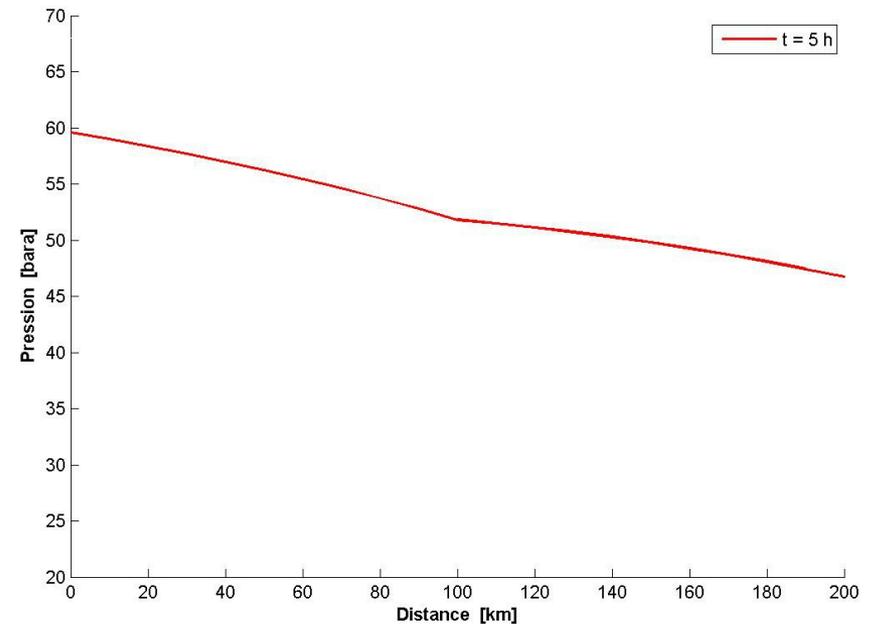
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

### État initial

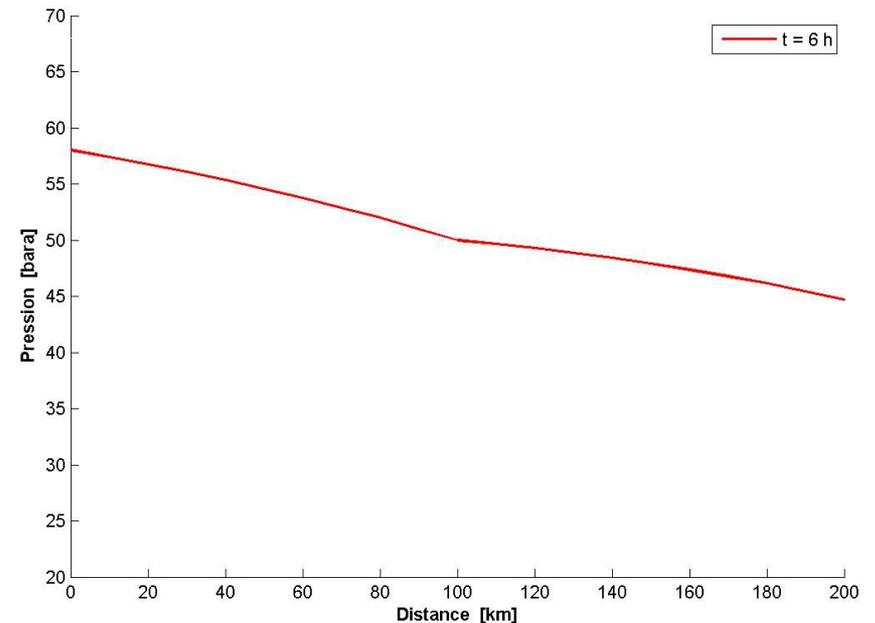
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

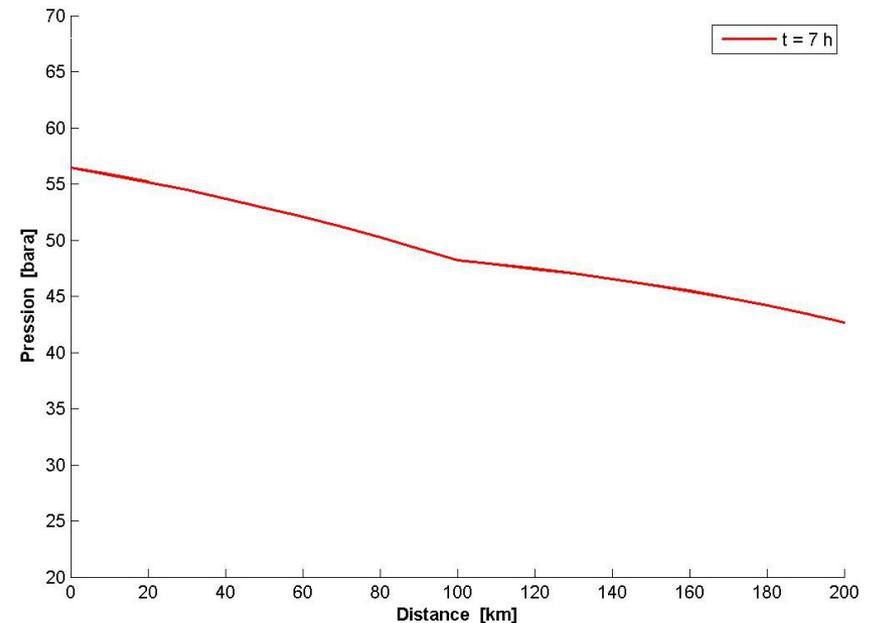
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

### État initial

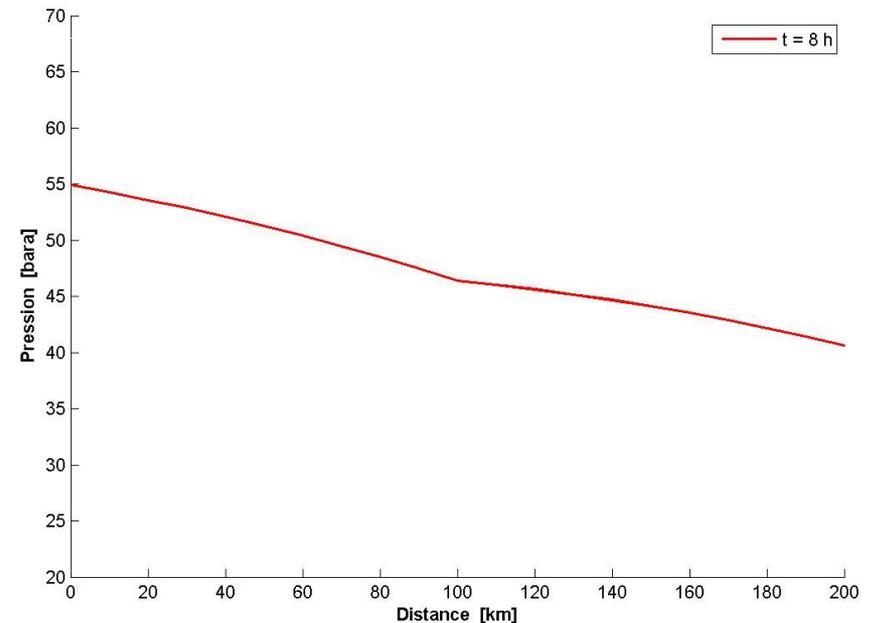
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - P_{initiale}(x) \pm D_{fourier}(x, t) - B_{masse}(t)$$

### État initial

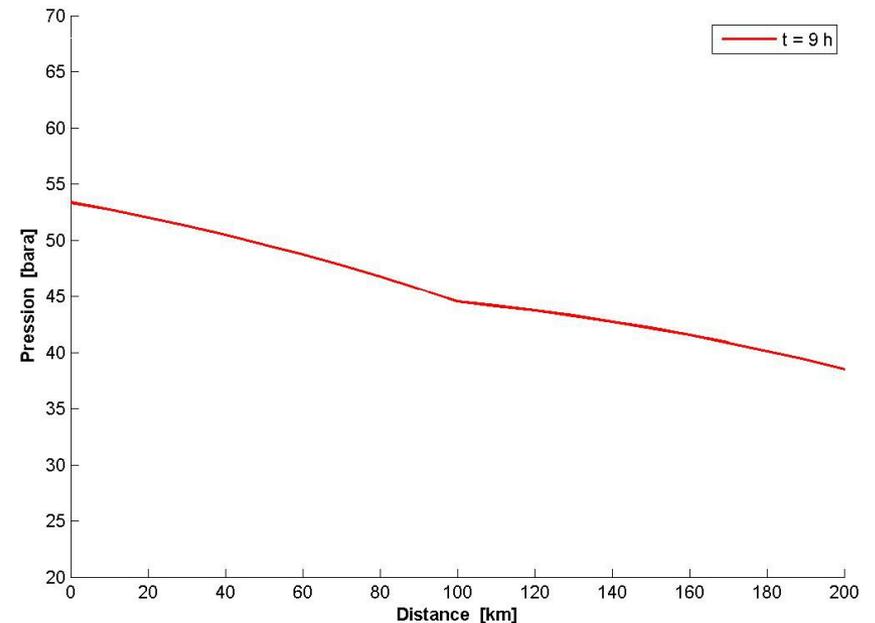
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

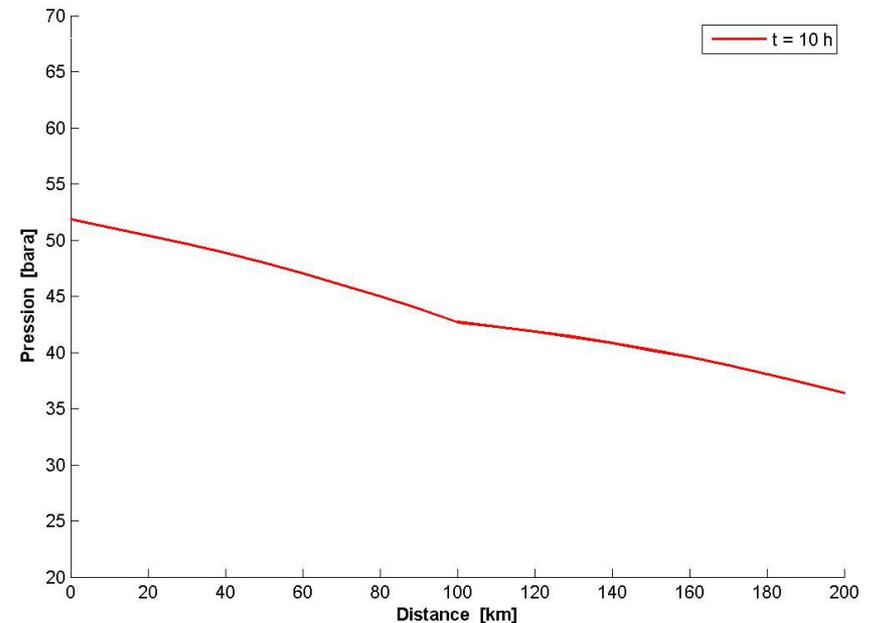
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    P<sub>e</sub> = 67 bara    L = 200 km    x<sub>cccg</sub> = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

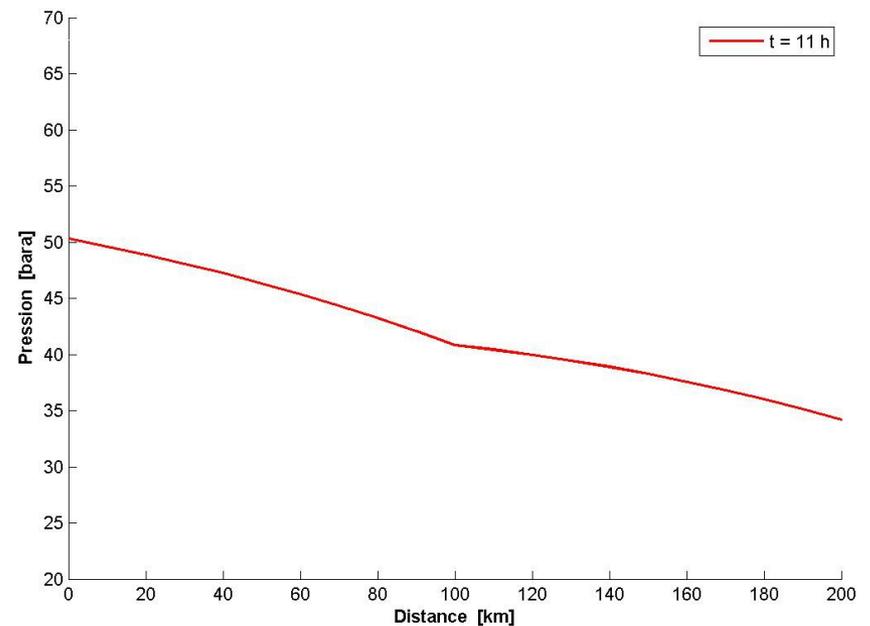
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Qcccg = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Qe = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    Pe = 67 bara    L = 200 km    xcccg = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : interprétation de la solution explicite

### Allure de la solution du problème

$$P^2(x, t) = P_{entree}^2 - \mathcal{P}_{initiale}(x) \pm \mathcal{D}_{fourier}(x, t) - \mathcal{B}_{masse}(t)$$

### État initial

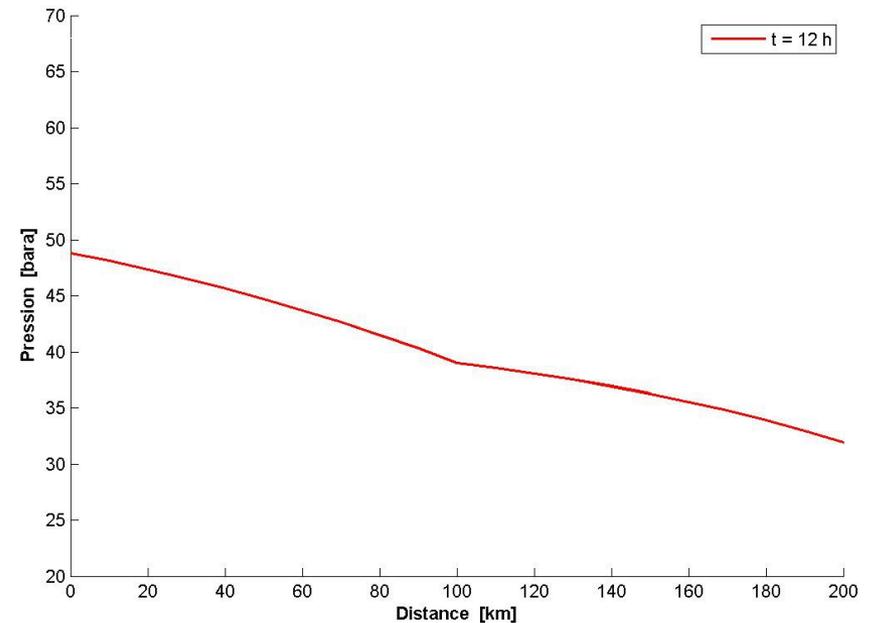
1. Pression à l'entrée de la canalisation
2. Pertes de charges propre à l'écoulement

### NEW : pertes de charges dynamiques

3. Diffusion du phénomène de la CCCG
4. Vidange de la conduite

Profil dynamique de pression en espace

Qcccg = 240000 Nm<sup>3</sup>/h    Qe = 450000 Nm<sup>3</sup>/h    Pe = 67 bara    L = 200 km    xcccg = 100 km    D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : explication du terme initial

### Pertes de charges dues à l'écoulement du gaz dans la conduite

$$P_{initiale}(x) \approx -\frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} x$$

### Coefficient des pertes de charges initiales

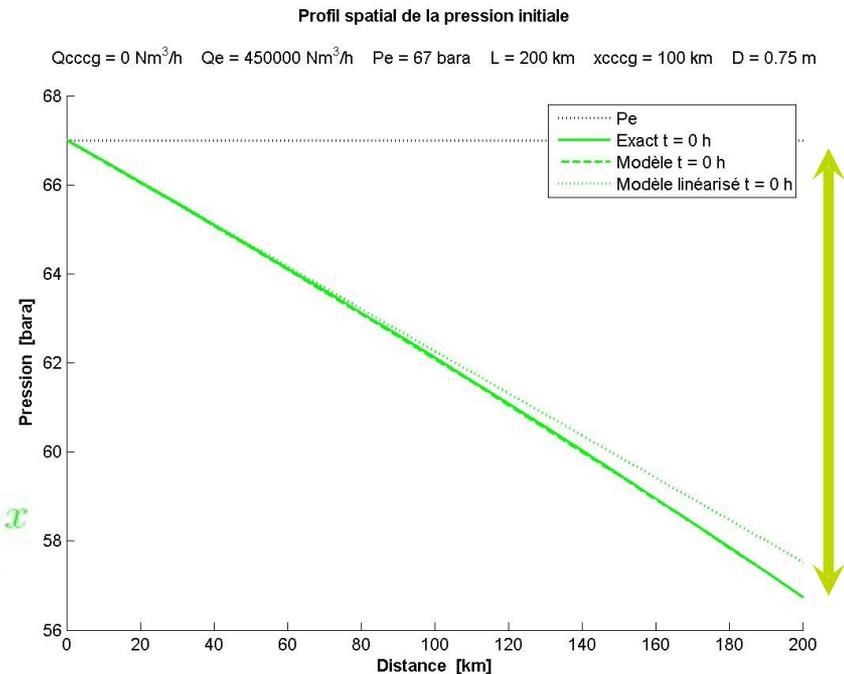
$$\eta_{ini} = \frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} \sim 6.8 \text{ bara}^2 \cdot \text{km}^{-1}$$

### Linéarisation de la pression initiale

$$P^2(x, 0) = P_{entree}^2 - \eta_{ini}x \implies P \approx P_e - \frac{\eta_{ini}}{2P_e}x$$

### Pente de la pression initiale

$$\frac{\eta_{ini}}{2P_e} \sim 0.047 \text{ bara} \cdot \text{km}^{-1}$$



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : explication du terme initial

### Pertes de charges dues à l'écoulement du gaz dans la conduite

$$P_{initiale}(x) \approx -\frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} x$$

### Coefficient des pertes de charges initiales

$$\eta_{ini} = \frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} \sim 6.8 \text{ bara}^2 \cdot \text{km}^{-1}$$

### Linéarisation de la pression initiale

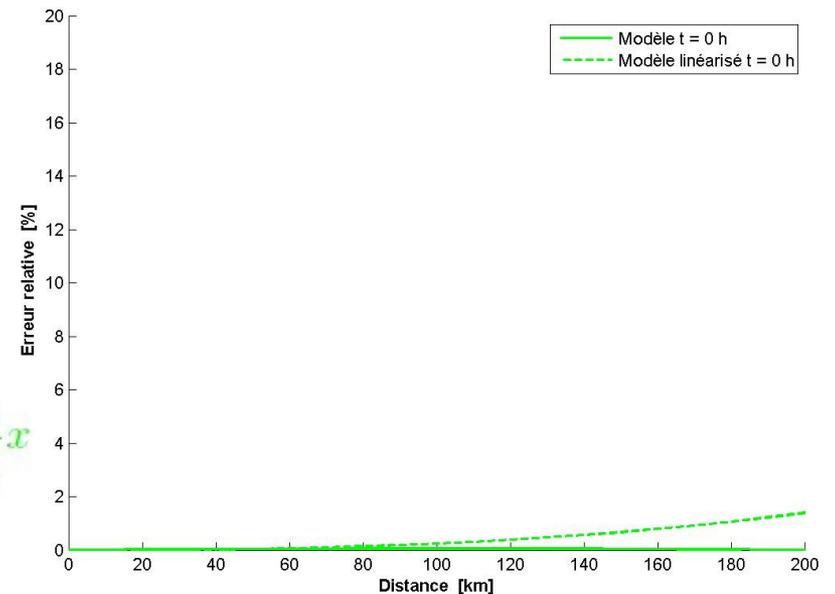
$$P^2(x, 0) = P_{entree}^2 - \eta_{ini}x \implies P \approx P_e - \frac{\eta_{ini}}{2P_e}x$$

### Pente de la pression initiale

$$\frac{\eta_{ini}}{2P_e} \sim 0.047 \text{ bara} \cdot \text{km}^{-1}$$

Erreur relative en espace commise sur la pression initiale et celle du modèle

Qcccg = 0 Nm<sup>3</sup>/h Qe = 450000 Nm<sup>3</sup>/h Pe = 67 bara L = 200 km xcccg = 100 km D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : explication du terme de diffusion

### État initial

- CCCG fermée
- Inexistence du phénomène
- Terme nul

0



### Régime transitoire

- Impact local de la CCCG
- Propagation du phénomène
- Terme complexe dépendant du temps et de l'espace

$\mathcal{D}_{fourier}(x, t)$



### Régime asymptotique

- Impact global de la CCCG en espace
- Phénomène propagé et établi
- Polynôme d'ordre deux en espace



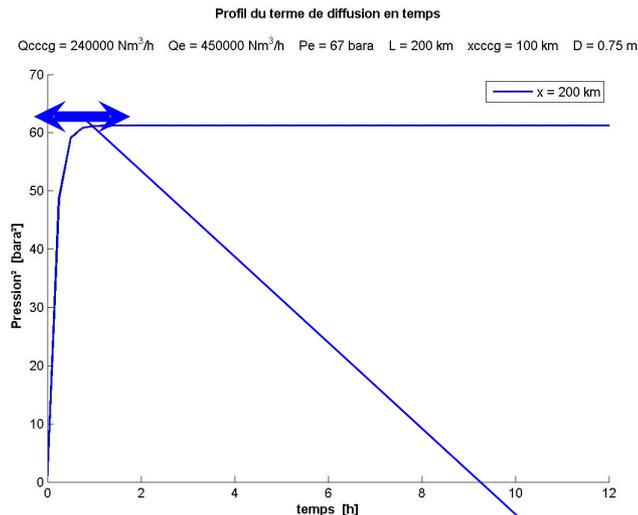
$\mathcal{D}_{fourier}(x)$

## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime transitoire de la diffusion

### Expression du terme de diffusion sous forme de série de Fourier

$$D_{fourier}(x, t) \approx \frac{4Z_{m0}Q_{entree}Q_{cccg}}{10^{11}LD^5} \sum_{n=1}^{+\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi x_{cccg}}{L}\right) \left(\frac{L}{n\pi}\right)^2 \left[ 1 - e^{-\frac{n^2\pi^2}{L^2} \frac{10^8 P_{m0} Z_{m0} D^3}{Q_{entree}} t} \right]$$

### Un régime qui devient indépendant du temps



### Durée du régime transitoire

$$\tau = \frac{L^2 Q_{entree}}{10^8 \pi^2 Z_{m0} P_{m0} D^3} \sim 33 \text{ min}$$

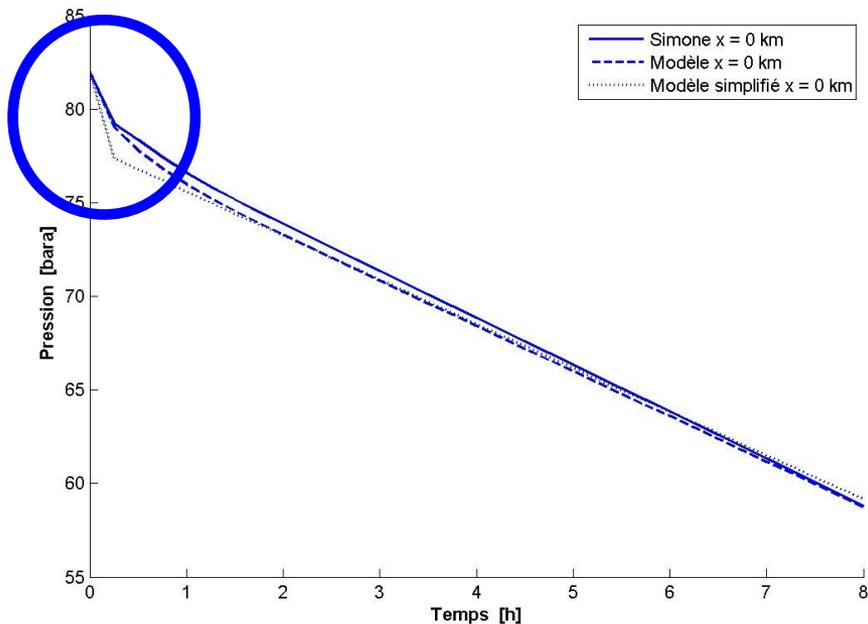
## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime transitoire de la diffusion

Un régime transitoire qui peut être négligé si sa durée est faible : la diffusion s'effectue alors instantanément

### Exemple de l'artère du Midi

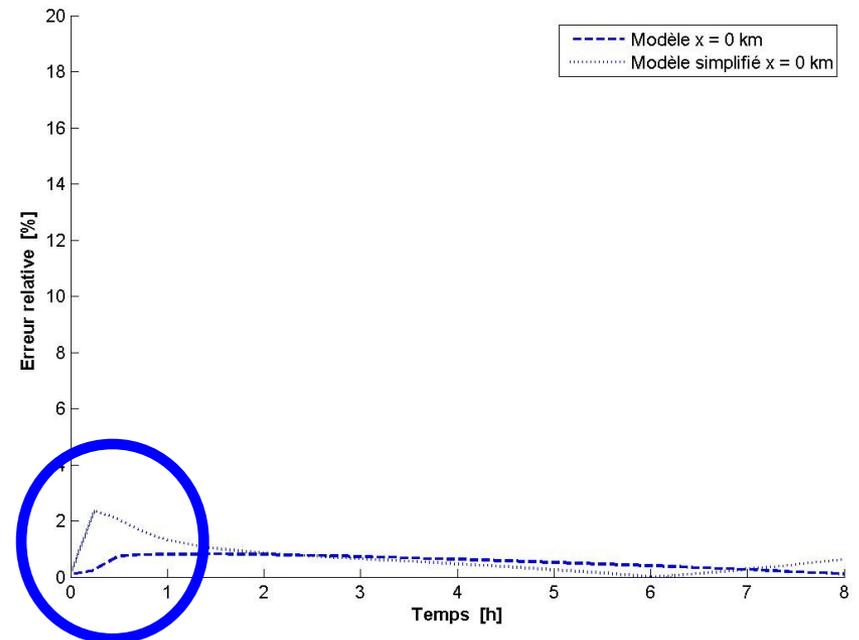
Profil du terme de diffusion en temps

$Q_{cccg} = 320000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $Q_e = 630000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $P_e = 82 \text{ bara}$   $L = 197 \text{ km}$   $x_{cccg} = 0 \text{ km}$   $D = 0.793 \text{ m}$



Erreur relative en temps commise sur la pression entre le modèle et Simone

$Q_{cccg} = 320000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $Q_e = 630000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $P_e = 82 \text{ bara}$   $L = 197 \text{ km}$   $x_{cccg} = 0 \text{ km}$   $D = 0.793 \text{ m}$



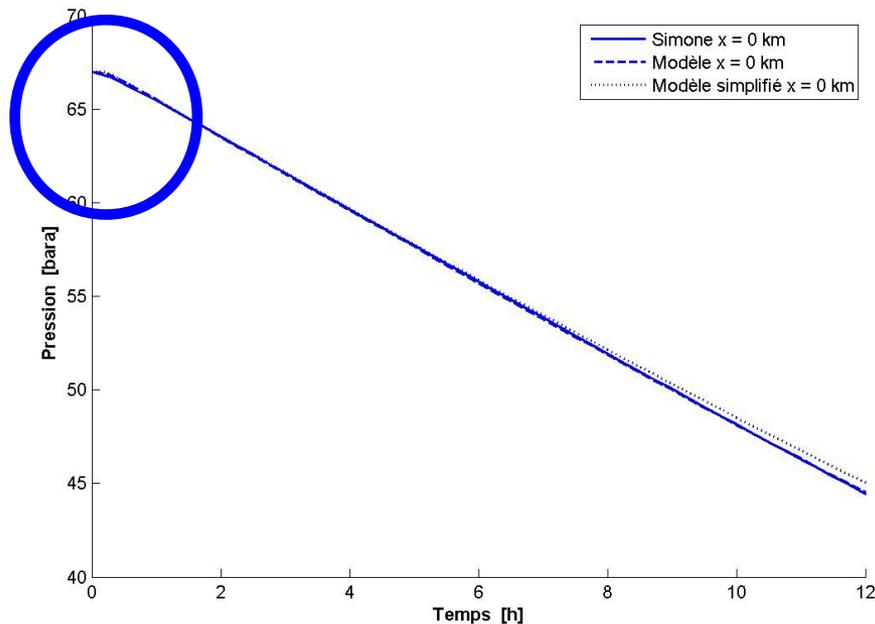
## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime transitoire de la diffusion

Un régime transitoire qui peut être négligé si sa durée est faible : la diffusion s'effectue alors instantanément

### Exemple de l'artère de Seine

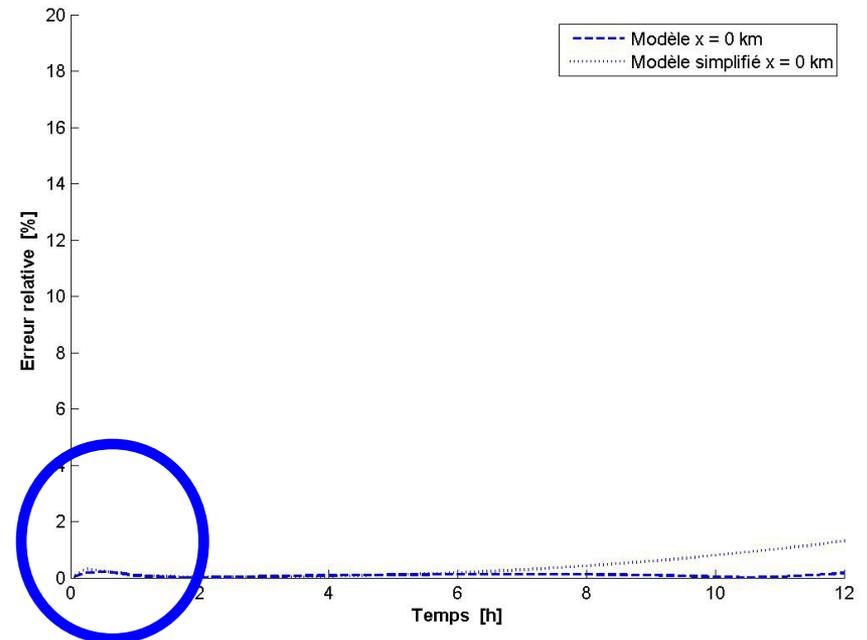
Profil du terme de diffusion en temps

$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $P_e = 67 \text{ bara}$   $L = 200 \text{ km}$   $x_{cccg} = 100 \text{ km}$   $D = 0.75 \text{ m}$



Erreur relative en temps commise sur la pression entre le modèle et Simone

$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$   $P_e = 67 \text{ bara}$   $L = 200 \text{ km}$   $x_{cccg} = 100 \text{ km}$   $D = 0.75 \text{ m}$



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime établi de la diffusion

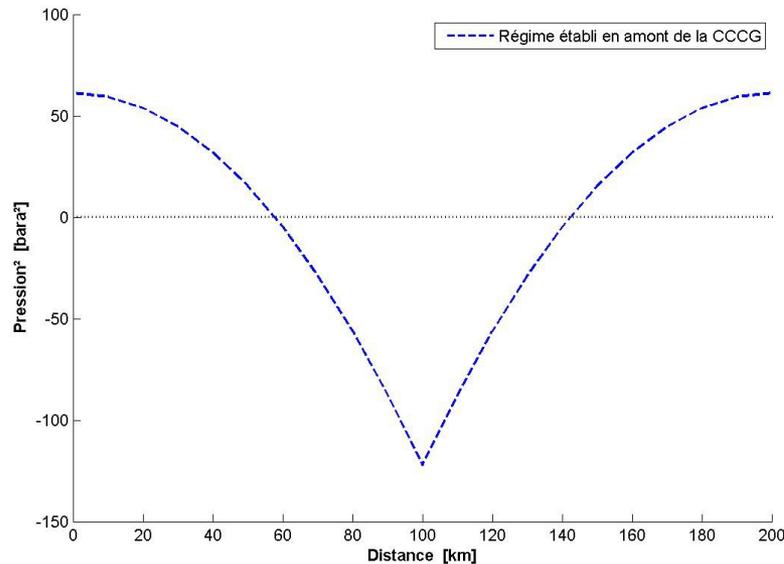
Une expression simple continue NON dérivable

$$D_{fourier}(x) = -\frac{2Z_{m0}Q_{entree}Q_{cccg}}{10^{11}LD^5} \left[ \frac{x^2 + x_{cccg}^2}{2} + \frac{L^2}{3} - L \begin{cases} x_{cccg} & \text{si } x \leq x_{cccg} \\ x & \text{si } x \geq x_{cccg} \end{cases} \right]$$

Pertes ou gains de charges suivant la position

Profil de diffusion en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h Pe = 67 bara L = 200 km x<sub>cccg</sub> = 100 km D = 0.75 m



## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime établi de la diffusion

### Coefficient de pertes de charges spatiales

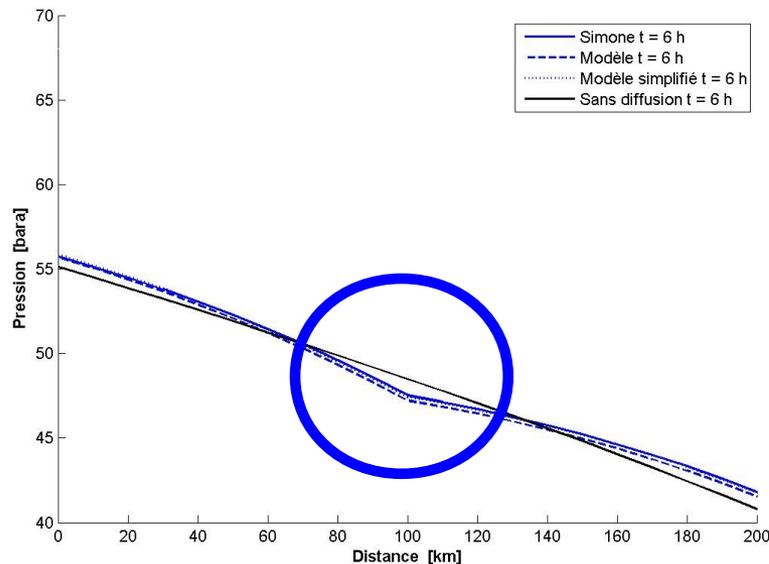
$$\eta_x = \frac{2Z_{m0}Q_{entree}Q_{cccg}}{10^{11}D^5} \sim 7.3 \text{ bara}^2.\text{km}^{-1}$$

$$\eta_{ini} = \frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} \sim 6.8 \text{ bara}^2.\text{km}^{-1}$$

### Des pertes de charges spatiales qui peuvent être importantes

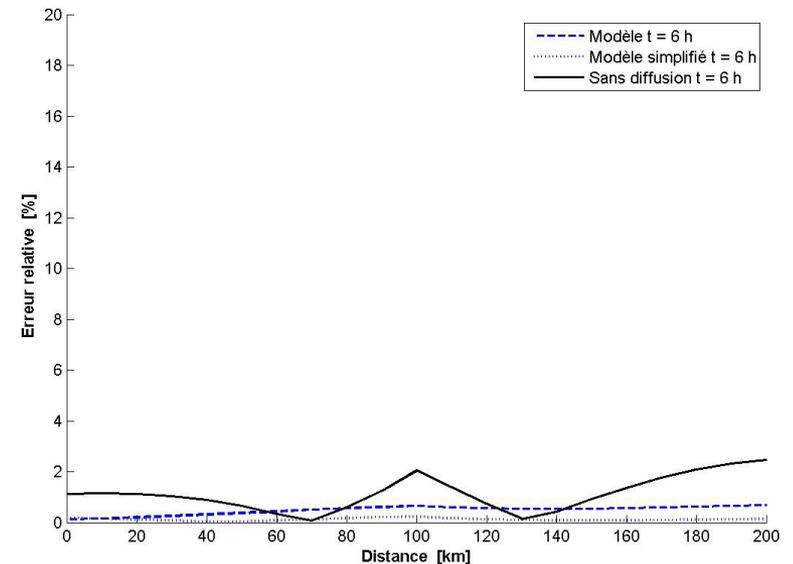
Profil de diffusion en espace

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h P<sub>e</sub> = 67 bara L = 200 km x<sub>cccg</sub> = 100 km D = 0.75 m



Erreur relative en espace commise sur la pression entre le modèle et Simone

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h P<sub>e</sub> = 67 bara L = 200 km x<sub>cccg</sub> = 100 km D = 0.75 m



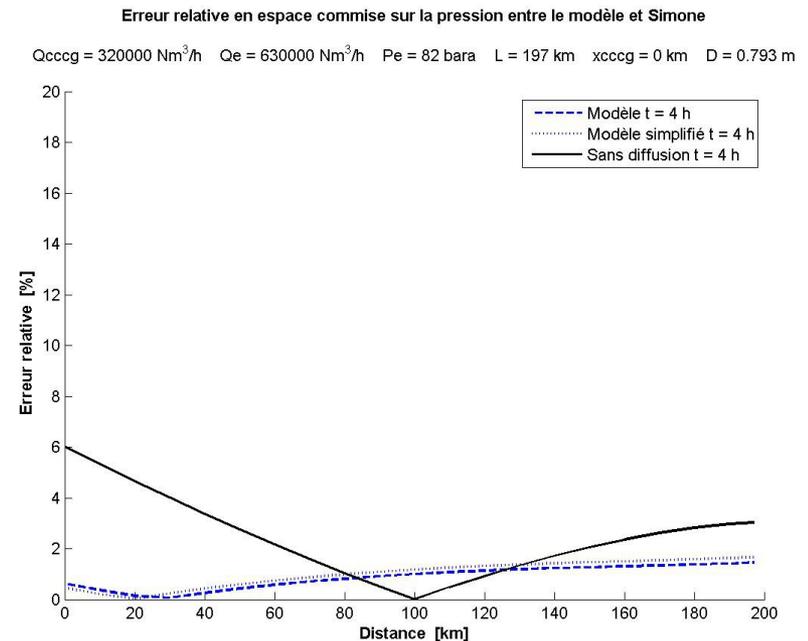
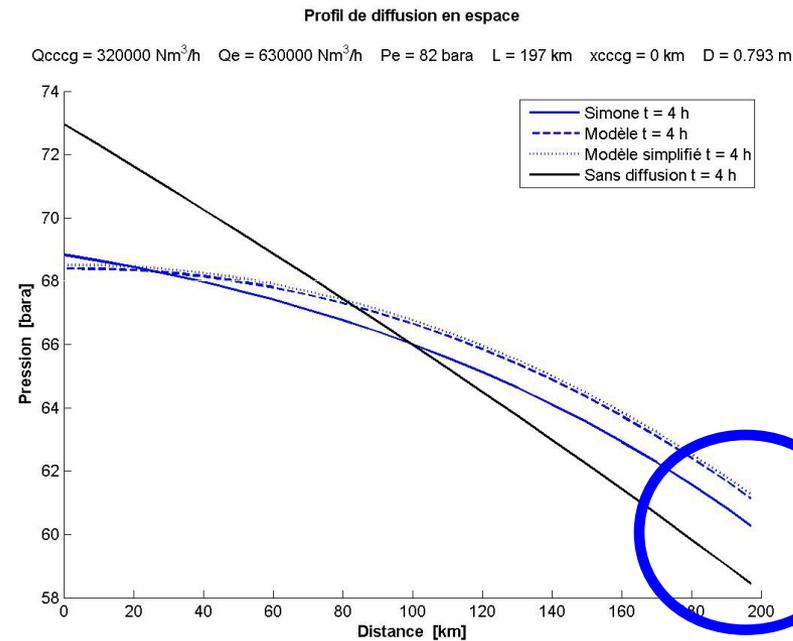
## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : régime établi de la diffusion

### Coefficient de pertes de charges spatiales

$$\eta_x = \frac{2Z_{m0}Q_{entree}Q_{cccg}}{10^{11}D^5} \sim 7.3 \text{ bara}^2.\text{km}^{-1}$$

$$\eta_{ini} = \frac{Z_{m0}Q_{entree}^2}{10^{11}D^5} \sim 6.8 \text{ bara}^2.\text{km}^{-1}$$

### Des pertes de charges spatiales qui peuvent être importantes

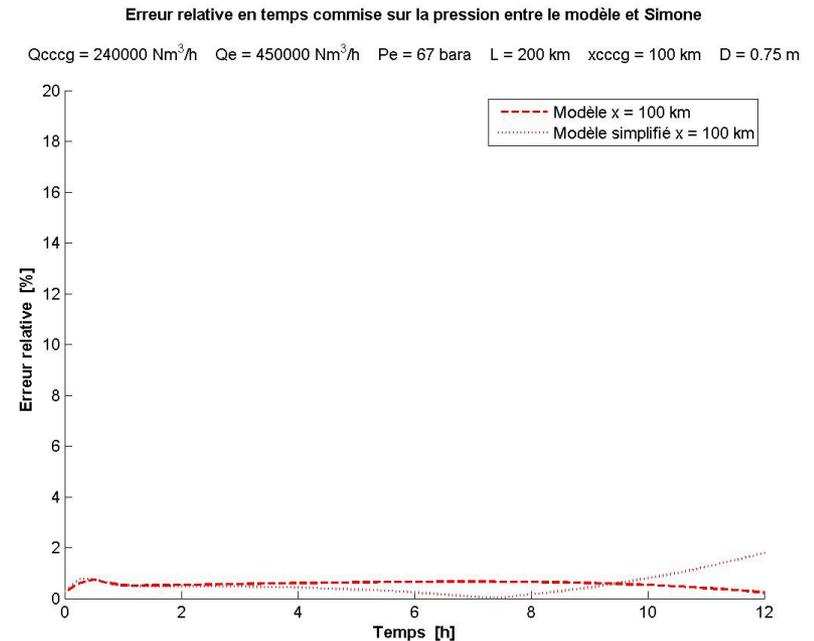
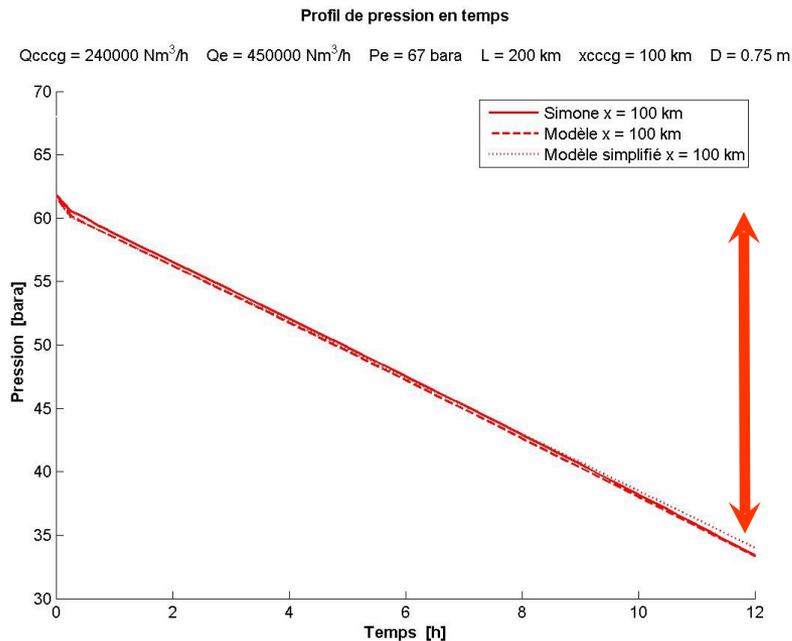


## ■ Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : explication du terme dynamique

### Terme issu du bilan de masse : vidange de la canalisation par la CCCG

$$B_{masse}(t) \approx -2P_{m0} \left( \frac{Z_{m0}^2 Q_{cccg}}{10^3 LD^2} t \right) + \left( \frac{Z_{m0}^2 Q_{cccg}}{10^3 LD^2} t \right)^2$$

### Impact global de la CCCG en temps



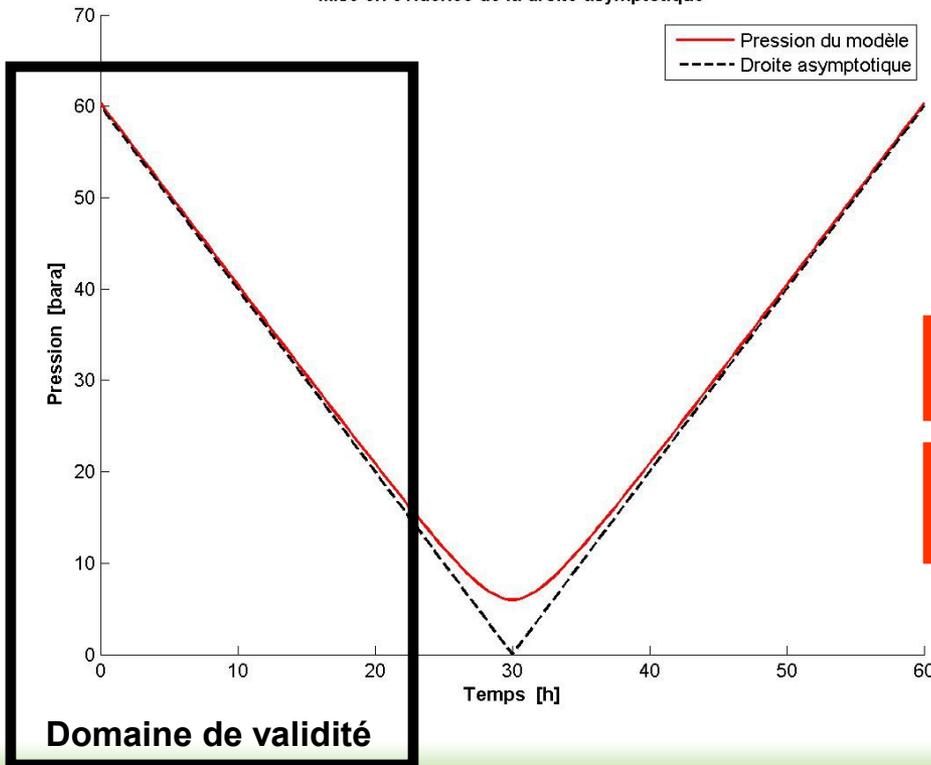
**Un modèle qui permet de comprendre les phénomènes : explication du terme dynamique**

**Coefficient de pertes de charges temporelles = Coefficient de la pente de la droite asymptotique**

$$\eta_t = \frac{Z_{m0}^2 Q_{cccg}}{10^3 LD^2} \sim 2.2 \text{ bara.h}^{-1}$$

$$P = \eta_t | t - \frac{P_{m0}}{\eta_t} | \sqrt{1 + \frac{f(x)}{\eta_t^2 t^2}}$$

Mise en évidence de la droite asymptotique



**Après un régime transitoire, la perte de pression horaire est constante**

**La perte de pression est proportionnelle au débit de la CCCG**

## ■ Un modèle simple utilisable pour l'exploitation : formation d'un modèle simplifié

### Trois points de vue des phénomènes :

- Simulation Simone
- Modèle complexe (< 1 %)
- Modèle simplifié (< 5 %)

$$P^2(x, t) \approx P_e^2 - \eta_{ini} x - 2 P_{m0} \eta_t t + \eta_t^2 t^2 - \eta_x \left( \frac{x^2 + x_{cccg}^2}{2L} + \frac{L}{3} - \begin{cases} x_{cccg} & \text{si } x \leq x_{cccg} \\ x & \text{sinon} \end{cases} \right)$$

### Coefficient de pertes de charges initiales

$$\eta_{ini} = \frac{Z_{m0} Q_{entree}^2}{10^{11} D^5} \sim 6.8 \text{ bara}^2 \cdot \text{km}^{-1}$$

### Durée du régime transitoire de la diffusion

$$\tau = \frac{L^2 Q_{entree}}{10^8 \pi^2 Z_{m0} P_{m0} D^3} \sim 33 \text{ min}$$

### Coefficient de pertes de charges temporelles

$$\eta_t = \frac{Z_{m0}^2 Q_{cccg}}{10^3 L D^2} \sim 2.2 \text{ bara} \cdot \text{h}^{-1}$$

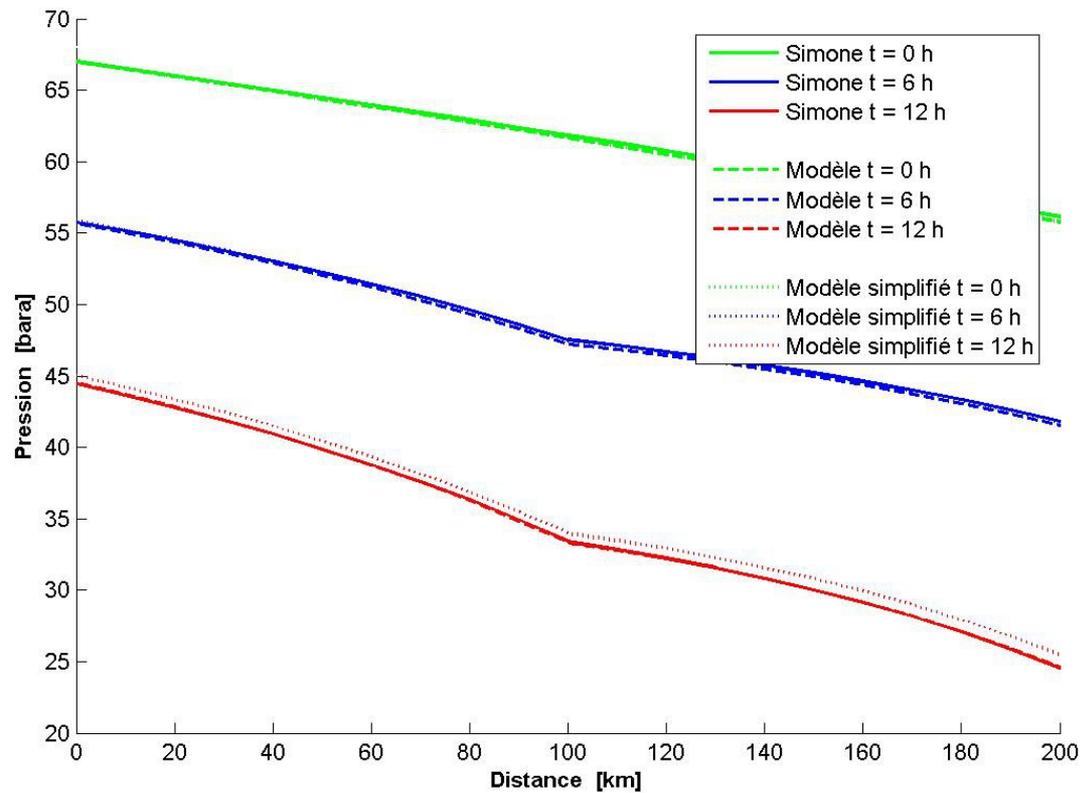
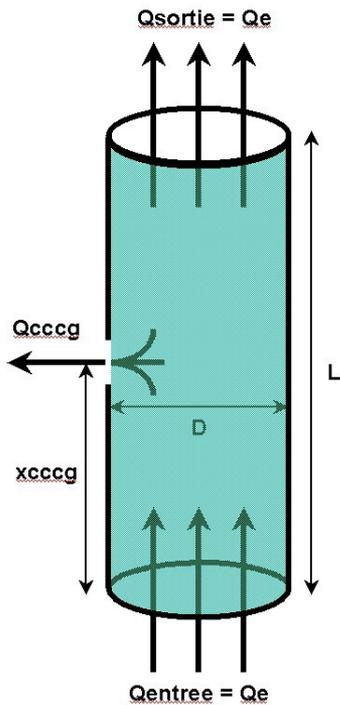
### Coefficient de pertes de charges spatiales

$$\eta_x = \frac{2 Z_{m0} Q_{entree} Q_{cccg}}{10^{11} D^5} \sim 7.3 \text{ bara}^2 \cdot \text{km}^{-1}$$

## Aperçu de la précision du modèle

Profil de pression en espace

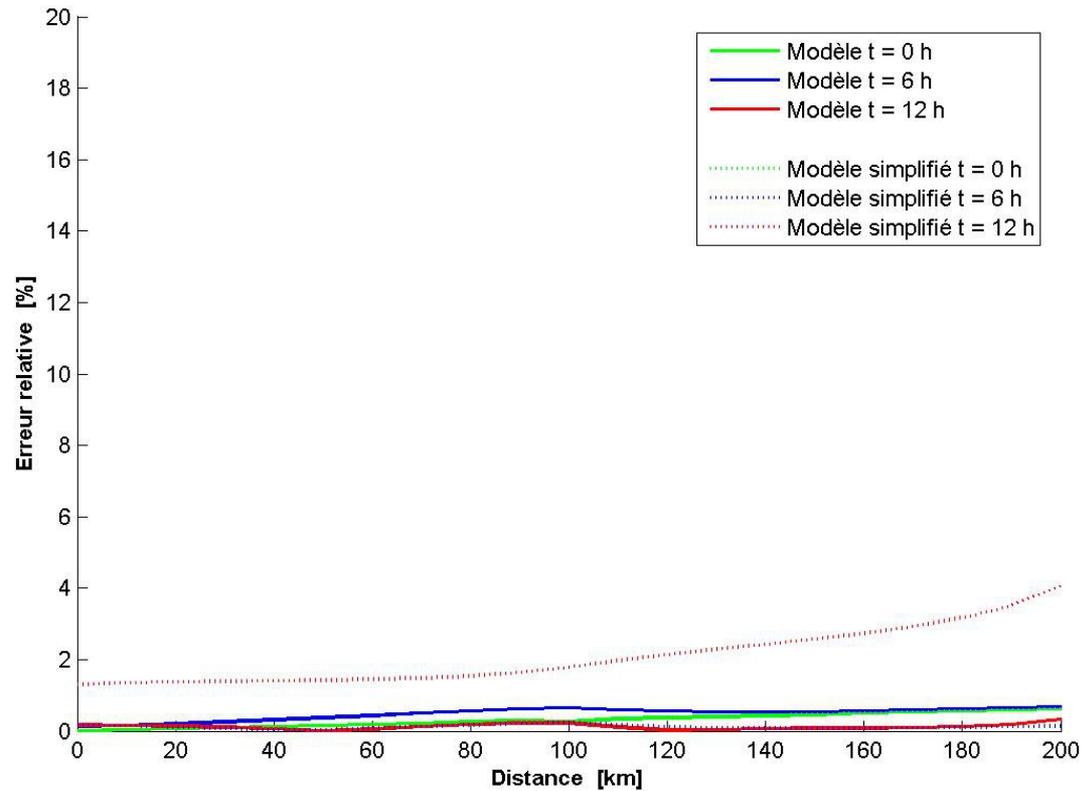
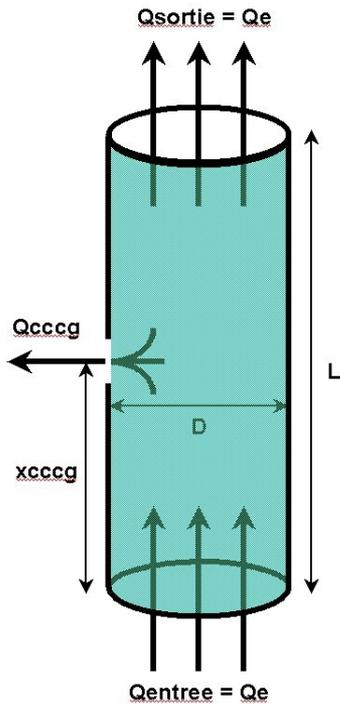
$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $P_e = 67 \text{ bara}$    
  $L = 200 \text{ km}$    
  $x_{cccg} = 100 \text{ km}$    
  $D = 0.75 \text{ m}$



## ■ Aperçu de la précision du modèle

Erreur relative en espace commise sur la pression entre le modèle et Simone

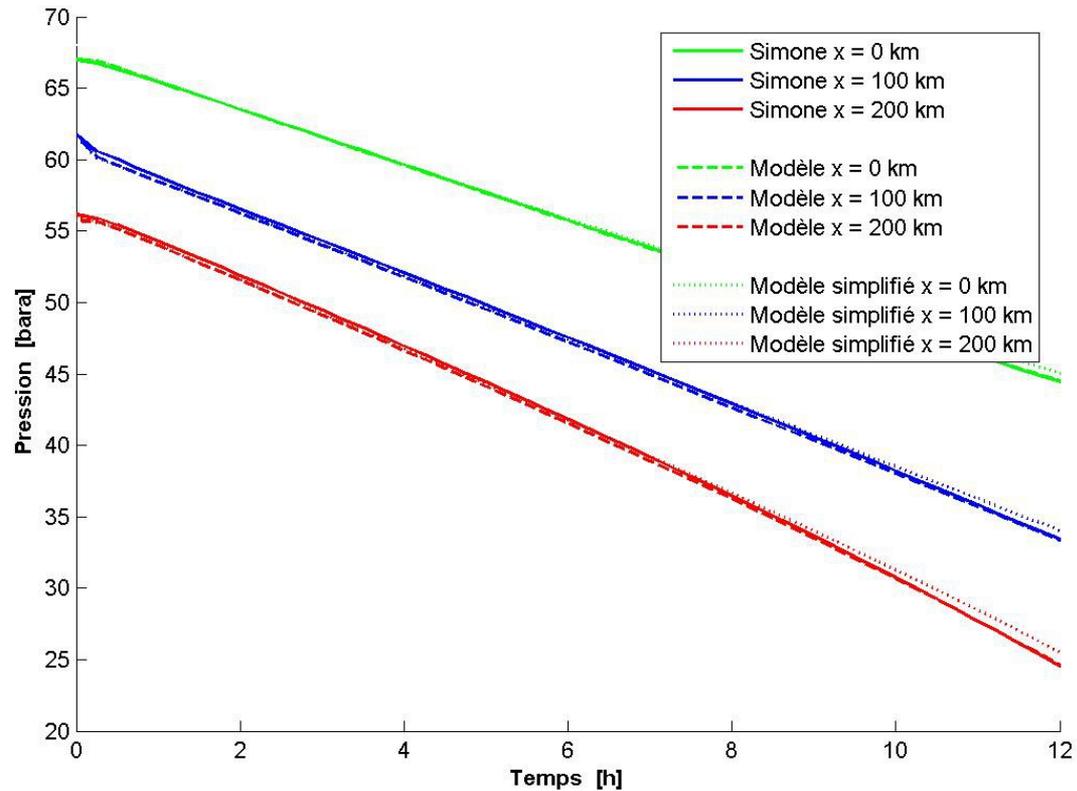
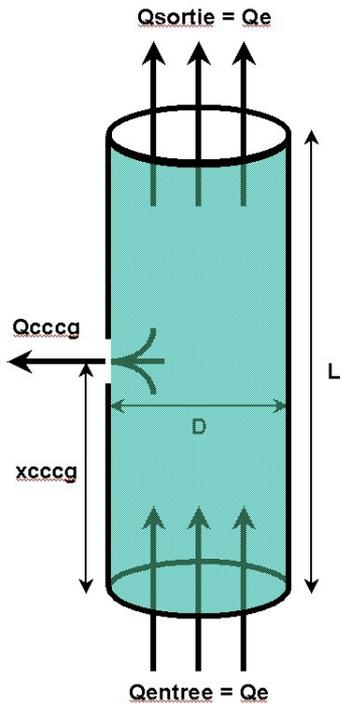
$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $P_e = 67 \text{ bara}$    
  $L = 200 \text{ km}$    
  $x_{cccg} = 100 \text{ km}$    
  $D = 0.75 \text{ m}$



## Aperçu de la précision du modèle

Profil de pression en temps

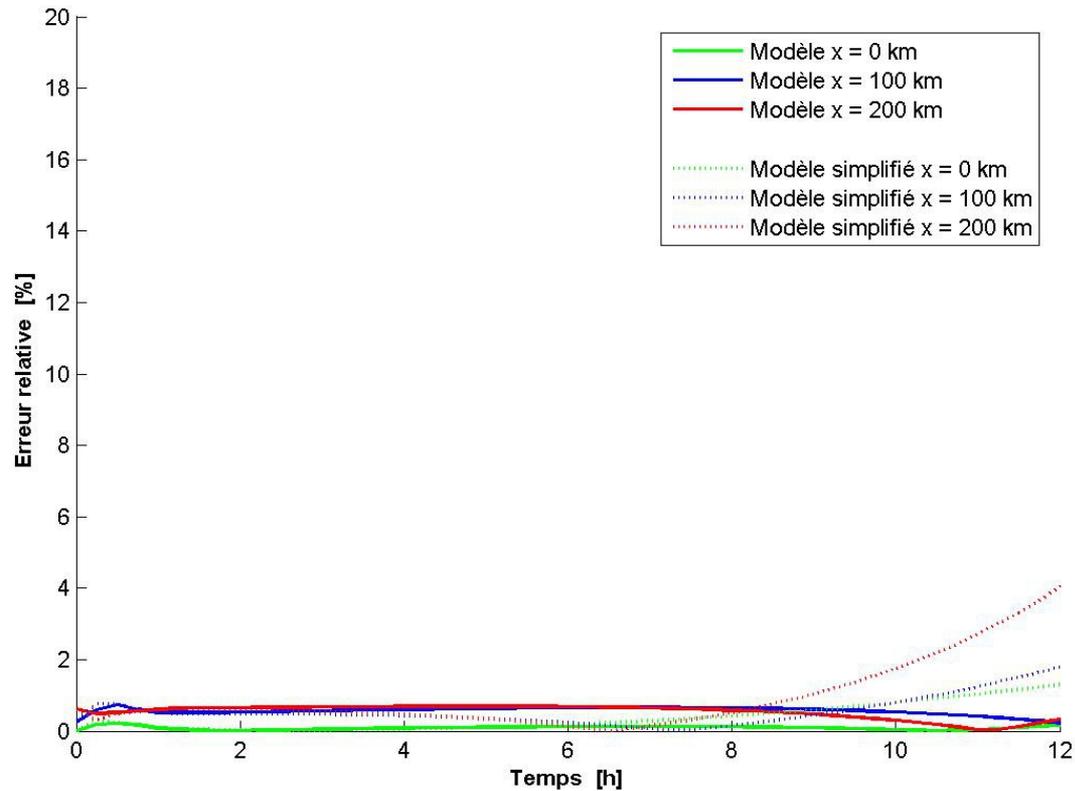
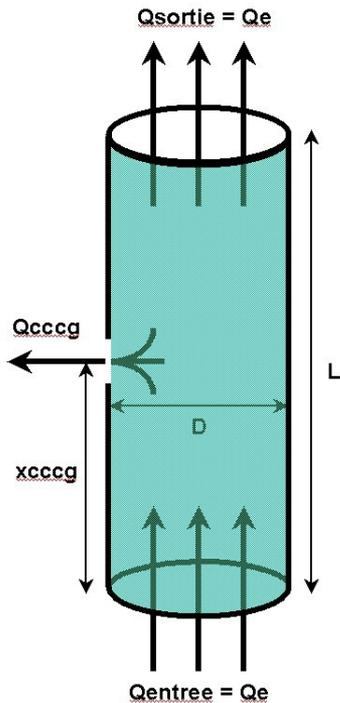
$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$    
  $P_e = 67 \text{ bara}$    
  $L = 200 \text{ km}$    
  $x_{cccg} = 100 \text{ km}$    
  $D = 0.75 \text{ m}$



## Aperçu de la précision du modèle

Erreur relative en temps commise sur la pression entre le modèle et Simone

$Q_{cccg} = 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$     $Q_e = 450000 \text{ Nm}^3/\text{h}$     $P_e = 67 \text{ bara}$     $L = 200 \text{ km}$     $x_{cccg} = 100 \text{ km}$     $D = 0.75 \text{ m}$

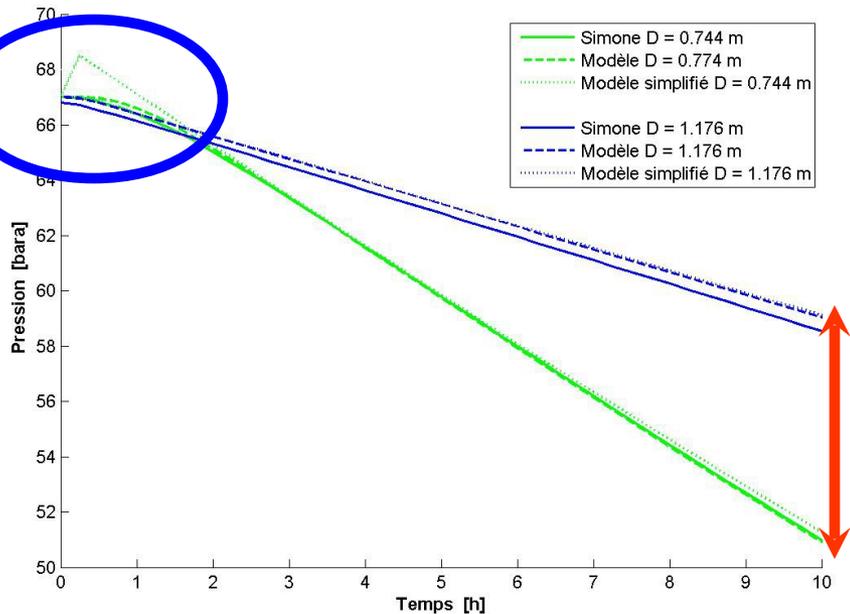


## Un modèle simple utilisable pour l'exploitation : un diamètre élevé réduit les pertes de charges

Données de l'artère de Seine avec deux diamètres : Dréel = 0.744 m et Dfictif = 1.176 m (Crau)

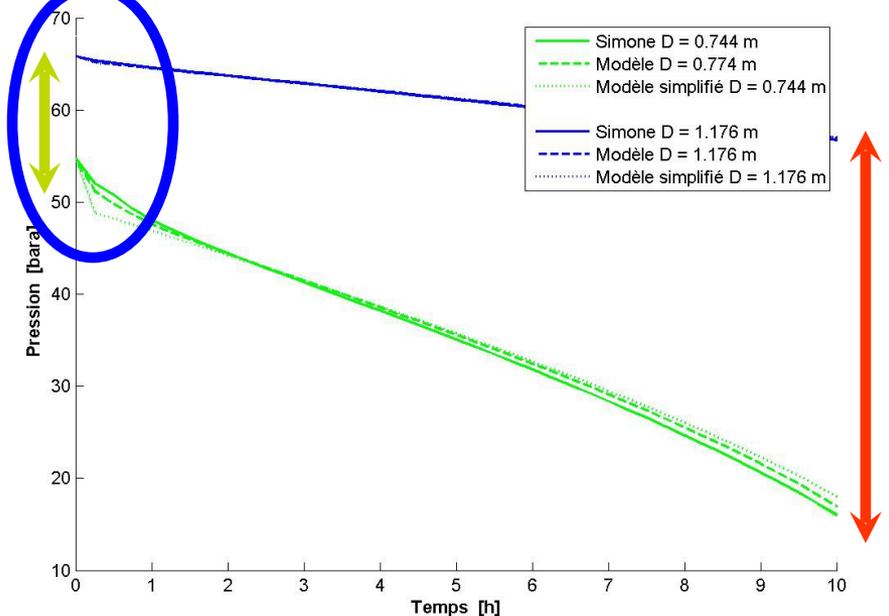
Profil de pression en temps à x = 0 km

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h P<sub>e</sub> = 67 bara L = 209.4 km x<sub>cccg</sub> = 209.4 km D = 1.176 m



Profil de pression en temps à x = 209.4 km

Q<sub>cccg</sub> = 240000 Nm<sup>3</sup>/h Q<sub>e</sub> = 450000 Nm<sup>3</sup>/h P<sub>e</sub> = 67 bara L = 209.4 km x<sub>cccg</sub> = 209.4 km D = 1.176 m



$$P^2(x, t) \approx P_e^2 - \eta_{ini} x - 2 P_{m0} \eta_t t + \eta_t^2 t^2 - \eta_x \left( \frac{x^2 + x_{cccg}^2}{2L} + \frac{L}{3} - \begin{cases} x_{cccg} & \text{si } x \leq x_{cccg} \\ x & \text{sinon} \end{cases} \right)$$

## ■ Un modèle simple utilisable pour l'exploitation : calcul du temps de dépassement de la Pmin

1. On se place en un point de la canalisation : xcana
2. On se fixe la pression minimale en ce point : Pmin
3. On cherche le temps de dépassement : T
4. On résout une équation du 2nd degré :

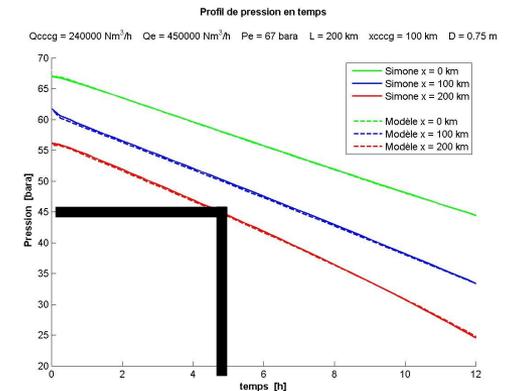
$$P_{min}^2 \approx P_e^2 - \eta_{ini} x_{cana} + (P_{m0} - \eta_t T)^2 - P_{m0}^2 + \eta_x \left( \frac{x_{cana}^2 + x_{cccg}^2}{2L} + \frac{L}{3} - \begin{cases} x_{cccg} & \text{si } x_{cana} \leq x_{cccg} \\ x_{cana} & \text{sinon} \end{cases} \right)$$

### Application numérique:

Données : xcana = 200 km Pmin = 45 bara

Résultats : Tmodele = 4 h 44 min 36.6 s Tsimone = 4 h 45 min

NON linéaire : Tlineaire = 4 h 20 min 51.36 s



## ■ Perspectives

- **Généralisation du modèle à un état initial, une entrée et une sortie quelconques.**
- **Etablir des stratégies de gestion dynamique du réseau.**
- **Etudier l'évolution des phénomènes sur un réseau complexe.**
- **Intégration de la méthode du modèle dans des outils d'aide à la décision.**

## ■ Conclusion

- ✓ La formulation explicite de la pression répond à notre problème
- ✓ Initiation prometteuse d'un processus de réflexion sur comment gérer le réseau dynamiquement
- ✓ Expérience enrichissante du point de vue personnel

## Questions ?