
Problème combinatoire sur le réseau de transport de gaz

Nicolas Derhy, Aurélie Le Maitre, Nga Thanh CRIGEN
Manuel Ruiz, Sylvain Mouret ARTELYS



Au programme

"crigen

Présentation du problème

→ Un problème d'optimisation combinatoire non-linéaire sur le réseau de transport de gaz

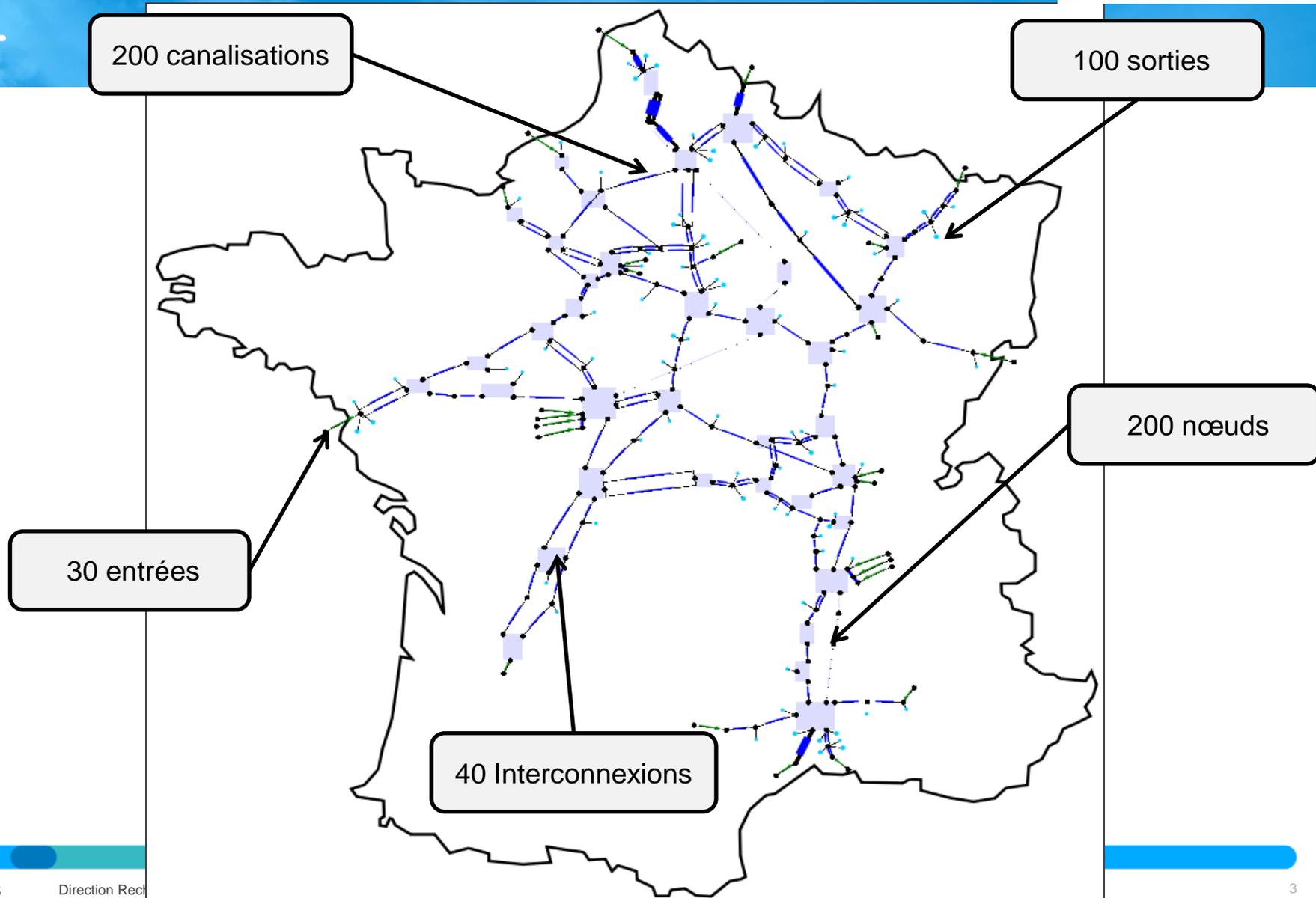
Résolution exacte

→ Résolution par une méthode exacte reposant sur la programmation linéaire en variables mixtes (ARTELYS)

Résolution approchée

→ Résolution par une heuristique reposant sur l'utilisation d'une VNS (CRIGEN)

Le réseau de transport national de gaz de GRTgaz



- **Les nœuds** : il s'agit des sommets du graphe auxquels sont connectés les différents éléments du réseau.
- **Les entrées du réseau** : il peut s'agir de stockages en émission, de terminaux méthaniers ou de points d'interface avec les réseaux des pays voisins.
 - Contrainte de **pression max** du gaz entrant dans le réseau
- **Les sorties du réseau** : il s'agit principalement de stockages en injection et de la consommation des réseaux régionaux.
 - Contrainte de **pression min** du gaz sortant du réseau afin de s'assurer de sa distribution dans les réseaux régionaux

Scénario déterministe : les volumes en entrée et en sortie du réseau sont parfaitement connus.

- Les canalisations permettent de transporter le gaz d'un nœud à un autre.
- La pression du gaz en sortie est moins importante qu'en entrée.

On parle de **perte de charge**, cette perte dépendant du débit, du type de gaz et des caractéristiques de la canalisation (diamètre, longueur, rugosité,...)

- Equation de perte de charge « fortement non linéaire » :

$$P_1^2 - e^A \cdot P_2^2 = C0 \cdot \frac{e^A - 1}{A} Z_m \cdot Q_{12} \cdot |Q_{12}|$$

- Contraintes de fonctionnement supplémentaires :

→ Débit min/max

→ Pression min/max

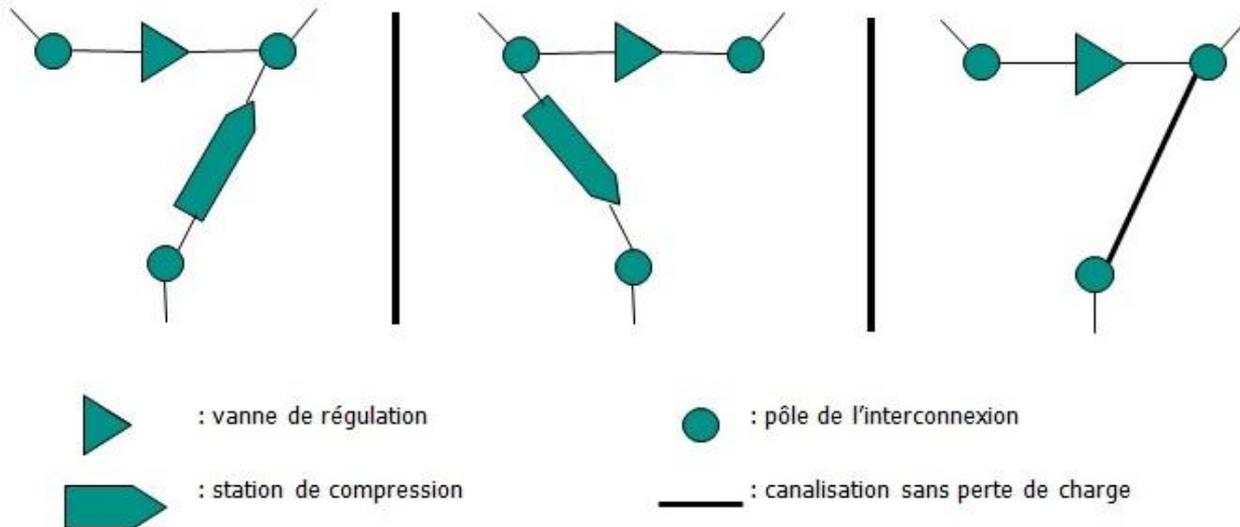
⇒ Nécessité de rehausser la pression afin de satisfaire les contraintes de pression min des sorties

- Il s'agit des **carrefours du réseau** : ils permettent d'une part de décider du routage du gaz et d'autre part de diminuer ou d'augmenter la pression du gaz grâce au positionnement possible d'ouvrages au sein même de l'interconnexion.
- Les ouvrages disponibles sont :
 - **Les vannes de régulation**
 - elles permettent de diminuer la pression du gaz la traversant.
 - Les canalisations à perte de charge négligeables
 - la pression aux bornes est la même
 - **Les stations de compression**
 - elles permettent d'augmenter la pression du gaz la traversant.
 - La compression maximum suit une loi non linéaire fonction des caractéristiques de la station, du débit, du type de gaz et de la pression en entrée.

Une interconnexion c'est quoi (2/2)

"crigen

- Le choix de la configuration de l'interconnexion correspond à la partie combinatoire du problème d'optimisation
- On dispose d'un catalogue de configurations possibles
- Le cœur de calcul doit choisir la configuration la plus adaptée.



⇒ Aspect combinatoire du problème qui ne se limite plus à un problème non linéaire en variables continues

Problématique générale

"crigen

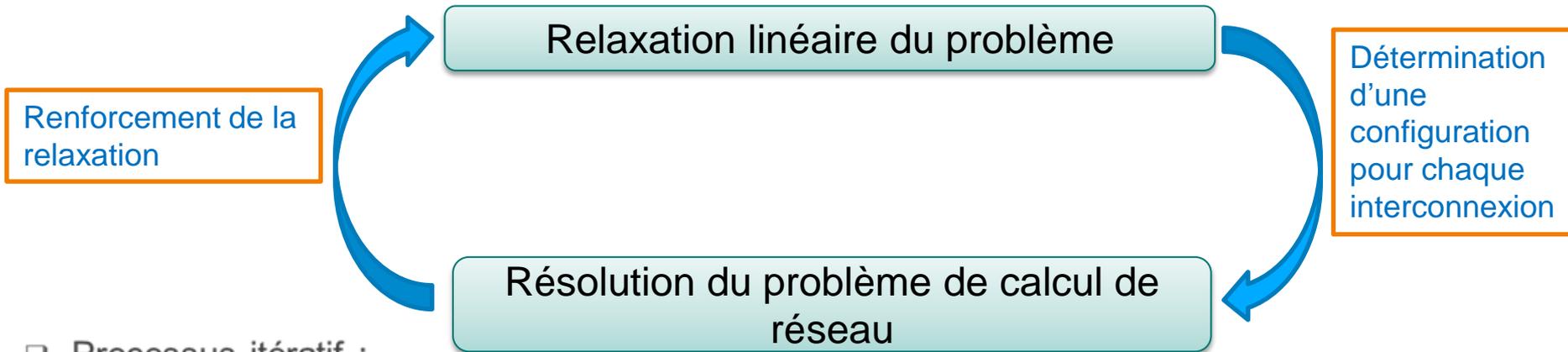
- Existe-il:
 - Une carte des débits et pressions
 - Une configuration pour chaque interconnexion
- Qui respecte toutes les contraintes physiques ?
 - Loi des nœuds en chaque nœud du réseau
 - Perte de charge le long des canalisations
 - Pression minimale aux sorties du réseau
 - Pression maximale aux entrées du réseau
 - Contraintes propres aux stations de compression

Grosse
Combinatoire
(60 000 configurations)

Fortement non
linéaires

Description de l'approche par méthode exacte

□ Méthode en 2 étapes :



□ Processus itératif :

1. Résolution du problème linéaire en variables mixtes qui permet d'obtenir une borne valide et une configuration pour chaque interconnexion
2. Résolution d'un problème non linéaires en variables continues, les variables discrètes étant fixées aux valeurs déterminées par la relaxation
3. Si l'écart entre la meilleure solution et la meilleure borne est non nul, la relaxation est renforcée.

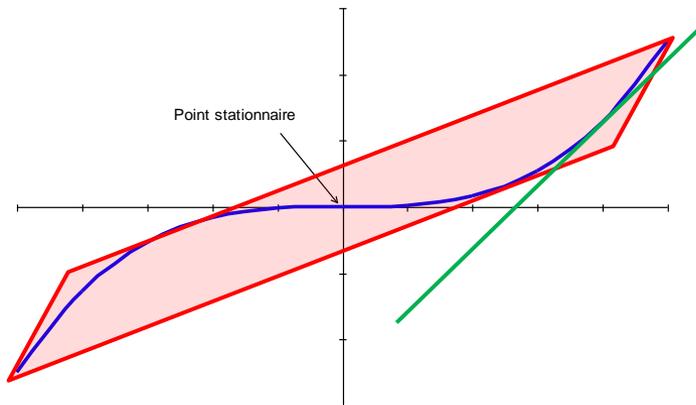
□ L'approche converge à ε près

1. la solution d'une relaxation n'est plus valide après le renforcement
2. La suite des bornes inférieures est strictement croissante

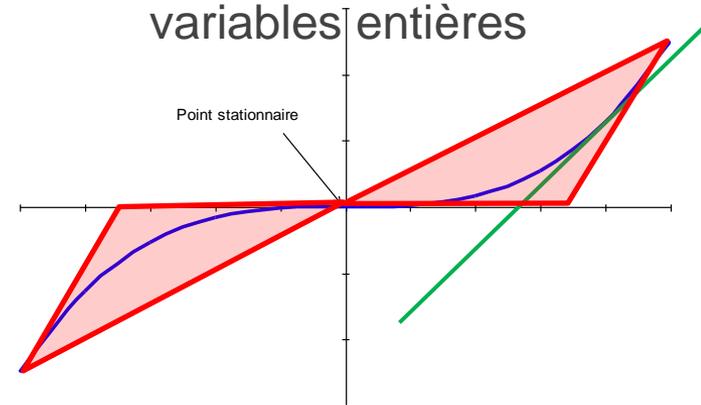
Construction de la relaxation

- La modélisation des états des ouvrages (ouvert, fermé, bipassé) peut généralement s'écrire de façon linéaire avec variables discrètes
- La difficulté principale réside dans la définition de relaxation linéaire pour les contraintes de fonctionnement non-linéaires (équations de perte de charge, mélange de PCS, fonctionnement des compresseurs, etc.)

Relaxation linéaire continue



Relaxation linéaire utilisant des variables entières



Bilan de cette approche

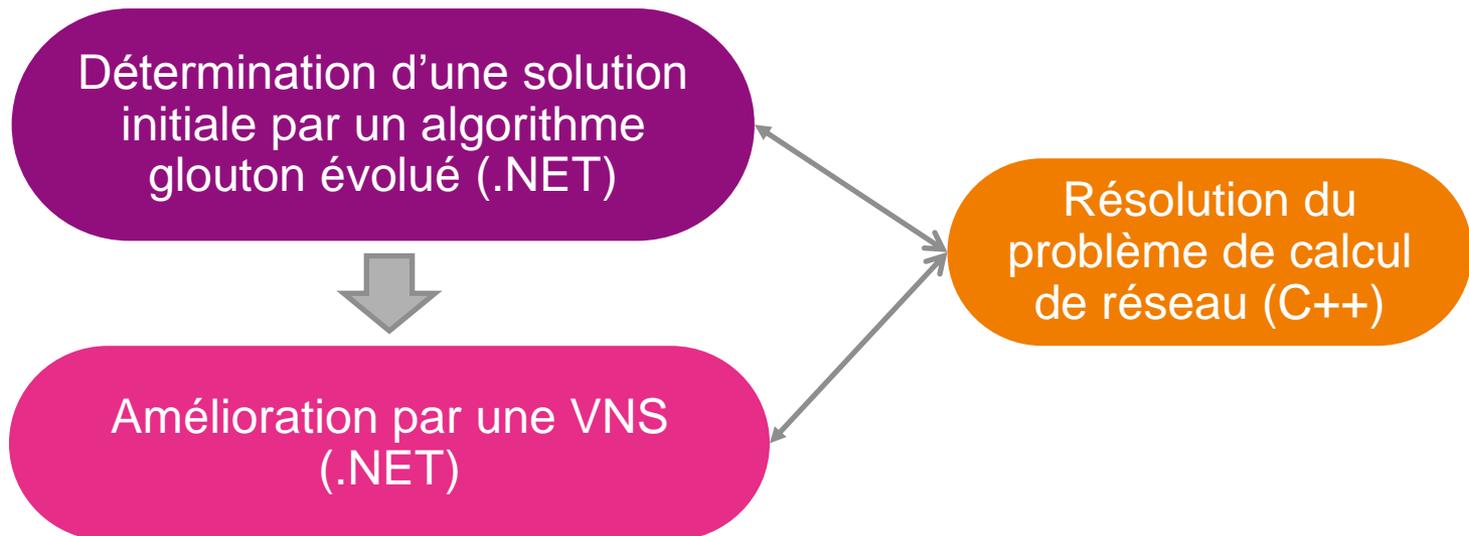
De nombreux problèmes rencontrés :

- Le nombre d'itérations que l'on espérait faible s'avère plus important que prévu ralentissant de ce fait la convergence
- Les temps de calcul sont très importants pour des jeux de données de taille réelle car la relaxation linéaire devient de plus en plus lourde et les solveurs n'arrivent plus à la résoudre lorsque le nombre d'itérations est important
- Il y a beaucoup de solutions symétriques dans le problème relaxé, le renforcement est peu efficace

Malgré quelques avantages :

- Méthode exacte permettant d'affirmer avec certitude s'il existe ou non des solutions lorsque le processus arrive à sa fin. Si le problème est infaisable la relaxation permet de comprendre pourquoi
- Certaines contraintes non linéaires comme celles des plages de fonctionnement des stations se prêtent bien à la linéarisation car quasi-convexe

- Algorithme glouton fixant une à une la configuration des interconnexions avec remise en cause possible (et rapide) des configurations précédemment choisies
- Amélioration progressive de la solution de l'algorithme glouton grâce à une VNS. Critère d'optimisation correspondant au niveau de violation des contraintes
- Utilisation d'un cœur de calcul C++ déterminant la carte des débits et des pressions quand les configurations de toutes les interconnexions sont connues



Résolution heuristique par VNS (2/3)

- VNS, algorithme de recherche locale par voisinage variable dont le principe est :
 - 1) $V = 1$, S = solution de l'algorithme glouton
 - 2) Recherche dans un voisinage de distance V d'une solution avec moins de violations que S
 - 3) Si aucune solution trouvée $V = V + 1$ et retour en 2)
Sinon, $V = 1$, mise à jour de S à partir de la nouvelle solution obtenue et retour en 2)

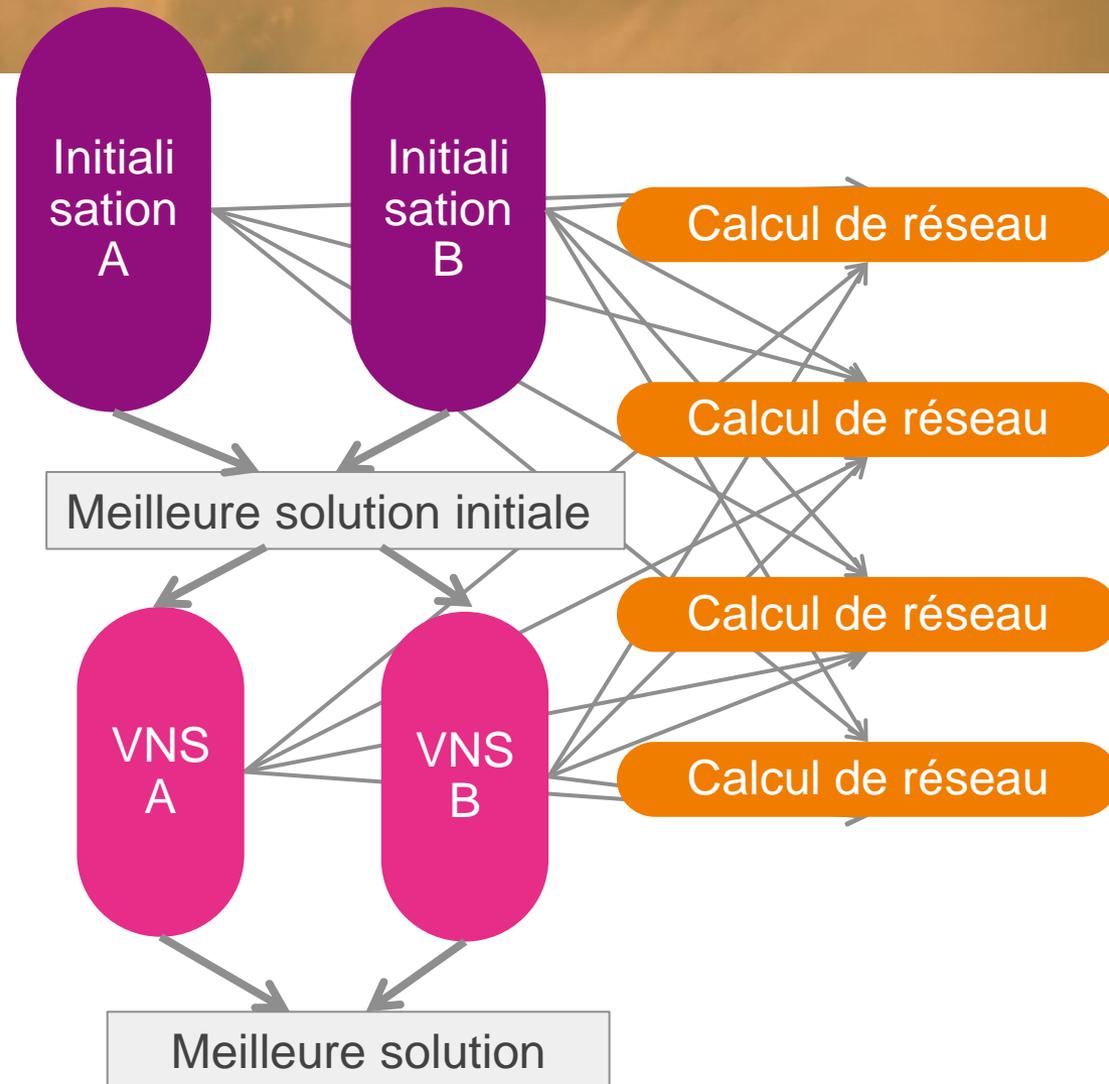
Jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisant toutes les contraintes
(Objectif = 0)

- Permet (normalement) d'éviter de rester bloqué sur un minimum local
- Fonctionne bien s'il n'est pas nécessaire de parcourir des voisinages trop éloignés (et donc de trop grande taille)
- Dans notre cas, le voisinage de taille V autour d'une solution S donnée consiste en l'ensemble des solutions dont exactement V interconnexions disposent d'une configuration différente

Résolution heuristique par VNS (3/3)

"crigen

- Exploitation de la puissance des **machines multicoeurs** pour maximiser le nombre de solutions évaluées.
- Plusieurs algorithmes en parallèles avec des paramètres différents
- A l'intérieur, parallélisation des évaluations de solutions
- S'adapte facilement au nombre de cœurs disponibles sur la machine (de 1 à 16)



Bilan de cette approche

"crigen

- Résultats très encourageants permettant de poursuivre dans l'optique du déploiement en 2015 :
 - Résolution des jeux de données réelles en moins de 30 minutes.
 - Pas de faux négatif (pour le moment !)
 - Exploitation importante du parallélisme dans les algorithmes
 - Bonne robustesse de l'approche vis-à-vis des minima locaux via le lancement de processus en parallèle
- Quelques inconvénients :
 - Très dépendant de la « boîte noire » permettant la résolution du calcul de réseau. Cette brique occupe plus de 90% du temps de calcul.
 - Paramétrage complexe et sensible... comme toute heuristique !
 - Approche heuristique sans garantie d'optimalité