

**Louvain School of Management**

# **Passage du réseau belge de gazoducs au gaz à haut pouvoir calorifique.**

Actualisation des données et analyse de la résilience du réseau.

Auteure : Lucie MATHIEU  
Promoteur : Daniel DE WOLF  
Année académique 2023-2024  
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de  
[Master 120] : Ingénieur de gestion, à finalité spécialisée  
Horaire de jour

## Declaration Regarding AI Tool Usage in Master's Thesis

We recognize that AI tools might be valuable aids during the master's thesis work, but they are not infallible. Remember that transparency fosters trust, and acknowledging AI's role enhances the credibility of your work.

Therefore, when deciding to use such a tool, you need to adhere to the following principles of responsible use of AI.

**1. Critical Evaluation :**

- We critically assessed the AI-generated output, ensuring its alignment with our research objectives.
- Any modifications or corrections were made based on our expertise and domain knowledge.

**2. Transparency :**

- We acknowledge the use of [NAME TOOL / SERVICE] transparently, emphasizing that it contributed to our work but did not replace human judgment.
- Our commitment to transparency ensures the integrity of this thesis.

**3. Ethical Considerations :**

- We actively monitored for biases or unintended consequences introduced by the AI tool.
- Our ethical responsibility guided our decisions throughout the research process.

## Declaration

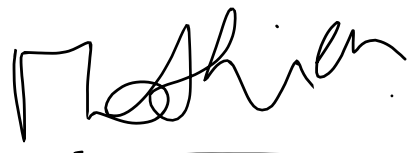
During the preparation of this master's thesis, the author(s) utilized ChatGPT (OpenAI) for the following purpose:

**1. Paraphrasing and Rephrasing:** The AI tool was used to rephrase and paraphrase text to improve clarity and readability, ensuring that the content was effectively communicated while maintaining the original meaning.

**2. Spelling and Grammar Checking:** The AI tool was employed to verify and correct spelling and grammar errors.

After using ChatGPT (OpenAI), the author(s) diligently reviewed and edited the content produced by the tool. We take full responsibility for the final content presented in this thesis.

By signing this declaration, we affirm that the content of this master's thesis reflects our original work, augmented by the responsible use of AI.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Rashid', written over a horizontal line.

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d’abord, je remercie chaleureusement, mon promoteur, le professeur Daniel De Wolf, pour son encadrement, ses conseils avisés et les nombreuses heures qu’il m’a consacrées tout au long de ce mémoire. Ses suggestions pertinentes et son expertise ont été indispensables à la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Nico Vanderpijpen, ingénieur du service Infrastructures, Capacity and Planning chez Fluxys, pour sa collaboration précieuse. Ses corrections et compléments de données ont permis d’affiner les modèles et d’assurer la justesse des conclusions.

Je suis reconnaissante envers mes amis, Constance, Niniane et tous les autres, pour leur soutien moral et leurs encouragements. Ils ont rendu cette période de travail plus agréable.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma famille, en particulier à ma maman et à mon frère, pour leur soutien indéfectible et leur compréhension tout au long de mon parcours académique. Leur amour et leur encouragement m’ont toujours donné la force de persévérer.

Merci à tous pour votre contribution à cette étape importante de ma vie.

Lucie Mathieu

## Table des matières

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Remerciements.....</i>                                                   | <i>III</i> |
| <i>Chapitre 1. Introduction.....</i>                                        | <i>1</i>   |
| <i>Chapitre 2. Le marché du gaz naturel en Belgique.....</i>                | <i>3</i>   |
| <b>2.1. Réseau international .....</b>                                      | <b>4</b>   |
| <b>2.2. Transport et distribution .....</b>                                 | <b>6</b>   |
| 2.2.1. Gaz pauvre (L) et gaz riche (H) .....                                | 7          |
| 2.2.2. La fin du gaz pauvre (L).....                                        | 7          |
| <i>Chapitre 3. Formulation du problème .....</i>                            | <i>9</i>   |
| <b>3.1. Problème principale .....</b>                                       | <b>9</b>   |
| <b>3.2. Contraintes.....</b>                                                | <b>10</b>  |
| 3.2.1. Contraintes sur les nœuds.....                                       | 10         |
| 3.2.2. Contraintes sur les arcs.....                                        | 11         |
| <b>3.3. Fonction objectif.....</b>                                          | <b>14</b>  |
| <b>3.4. Coefficient <math>C_{ij}</math>.....</b>                            | <b>15</b>  |
| <i>Chapitre 4. Méthode de résolution du problème .....</i>                  | <i>16</i>  |
| <b>4.1. Description et données du réseau belge de transport de gaz.....</b> | <b>16</b>  |
| 4.1.1. Carte et diagramme du réseau .....                                   | 16         |
| <b>4.2. Problème auxiliaire .....</b>                                       | <b>24</b>  |
| <b>4.3. Résultats .....</b>                                                 | <b>24</b>  |
| 4.3.1. Problème auxiliaire .....                                            | 24         |
| 4.3.2. Problème principal .....                                             | 25         |
| 4.3.1. Analyse des résultats .....                                          | 25         |
| <i>Chapitre 5. Résilience du réseau – Scénarios.....</i>                    | <i>31</i>  |
| <b>5.1. Explication de la nouvelle situation .....</b>                      | <b>31</b>  |
| <b>5.2. Nouvelles quantités <math>s_i</math> .....</b>                      | <b>33</b>  |
| <b>5.3. Analyse des résultats .....</b>                                     | <b>35</b>  |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Chapitre 6. Conclusions .....</i>                                                                           | <i>36</i> |
| <i>Bibliographie .....</i>                                                                                     | <i>39</i> |
| <i>Annexe 1 – Entreprises actives en 2022 sur le marché belge sur le plan du shipping de gaz naturel .....</i> | <i>43</i> |
| <i>Annexe 2 – Coefficient Cij.....</i>                                                                         | <i>44</i> |
| <i>Annexe 3 – Comment traiter deux arcs parallèles .....</i>                                                   | <i>45</i> |
| <i>Annexe 4 – Hypothèses et sources des arcs du réseau.....</i>                                                | <i>47</i> |
| <i>Annexe 5 – Hypothèses et sources des nœuds du réseau.....</i>                                               | <i>50</i> |
| <i>Annexe 6 – Données d’importation et d’exportation de gaz vers et depuis le Belgique. 53</i>                 |           |
| <i>Annexe 7 – Scénarios : Hypothèses des nœuds du réseau .....</i>                                             | <i>54</i> |
| <i>Annexe 8 – Modèle GAMS avec compresseurs.....</i>                                                           | <i>56</i> |
| <i>Annexe 9 – Modèle GAMS scénarios .....</i>                                                                  | <i>63</i> |

## Chapitre 1. Introduction

Le gaz naturel, appelé simplement « gaz » dans ce mémoire, est l'une des principales sources d'énergie primaire consommées en Belgique. En effet, comme le montre la Figure 1, près d'un quart de la consommation d'énergie primaire en 2022 provient du gaz, soit 13 *Mtep*<sup>1</sup> ou encore 151 *TWh*.

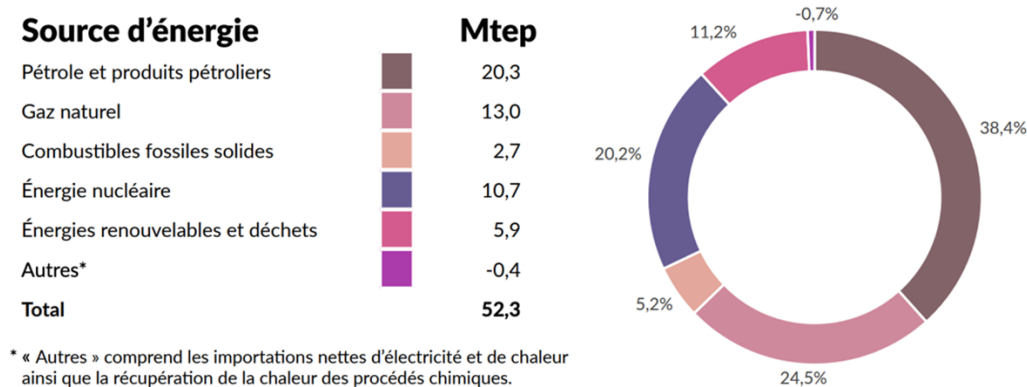


Figure 1 – Consommation d'énergie primaire en Belgique en 2022 par source d'énergie (SPF Économie, 2024)

Ce mémoire s'appuie sur l'article « *The Gas Transmission Problem Solved by an Extension of the Simplex Algorithm* » des Professeurs Daniel De Wolf et Yves Smeers, publié dans *Management Science* en 2000. Cependant, à l'époque où cet article a été publié, l'objectif d'une entreprise gazière était de satisfaire la demande à divers points du réseau en achetant du gaz au prix d'achat minimal. Aujourd'hui, la fonction de transport et la fonction d'achat de gaz sont distinctes. Il est donc crucial de comprendre et d'analyser le réseau de transport de gaz belge en utilisant des données actualisées de ce réseau et en modifiant le modèle.

Le **premier objectif** de ce mémoire est de mettre à jour le modèle proposé par De Wolf et Smeers (2000) en intégrant ces changements. Pour ce faire, nous introduirons une modélisation des compresseurs dans le modèle initial. Cependant, l'introduction des compresseurs change la nature du problème d'optimisation. Alors que l'ancien problème était non linéaire, non convexe mais séparable, le nouveau modèle présente une relation entre l'augmentation de la pression et le débit dans les compresseurs qui n'est plus séparable. En nous appuyant sur les travaux de Bakhouya et De Wolf (2008), nous proposerons une approche en deux phases. D'abord, nous

<sup>1</sup> Million de tonnes équivalent pétrole.

résoudrons un problème auxiliaire convexe, facile à résoudre en utilisant un logiciel de modélisation mathématique classique. Pour ce mémoire, nous utiliserons GAMS. Ensuite, la deuxième étape consistera à utiliser la solution de ce problème auxiliaire comme point de départ pour résoudre le modèle complet.

Pour faire tourner ce nouveau modèle et comme **deuxième objectif** de ce mémoire, nous utiliserons des données actualisées du réseau de transport de gaz belge. En effet, au cours des deux dernières années, le marché européen du gaz a connu de nombreux changements. Parmi ceux-ci figurent d'une part la diminution progressive des approvisionnements en gaz à bas pouvoir calorifique (gaz L) en provenance des Pays-Bas et la réduction drastique des importations de gaz russe. Cela a eu un très fort impact sur les importations et exportations de gaz du réseau belge. D'autre part, des investissements colossaux ont été réalisés au cours de ces vingt dernières années, comme l'installation de nouveaux compresseurs sur le réseau, ou encore le dédoublement de certaines canalisations.

Comme **troisième objectif** de ce mémoire, nous montrerons que le réseau de transport de gaz belge est particulièrement résilient aux changements. En effet, grâce aux investissements importants réalisés, la Belgique a réussi à s'adapter à ces changements sans avoir besoin de renforcer son réseau par la construction de nouveaux gazoducs ou de nouvelles stations de compression. Cela a permis au réseau de répondre efficacement aux variations des volumes et aux changements dans la direction des flux. Parmi les changements majeurs, nous analyserons, entre autres, l'impact du passage des Pays-Bas et de l'Allemagne du statut d'exportateurs à celui d'importateurs sur le réseau belge.

Pour atteindre ces objectifs nous suivrons le raisonnement suivant. Une vue d'ensemble du marché du gaz naturel en Belgique sera présentée dans le chapitre 2, suivi par la formulation du problème, introduite dans le chapitre 3. Le chapitre 4 présentera la méthode de résolution du problème avec une description détaillée du réseau de transport de gaz belge, suivi par les principaux résultats des problèmes auxiliaire et principal. Dans le chapitre 5, nous prouverons la résilience du réseau de transport de gaz belge soumis à divers changements significatifs dans ses importations et exportations. Enfin, nous ferons part de nos conclusions et des limites que nous avons rencontrées dans le chapitre 6.

## Chapitre 2. Le marché du gaz naturel en Belgique

Le secteur du transport de gaz naturel à haute pression a subi de grands changements ces deux dernières décennies. En effet, suite à la libéralisation des marchés de l'énergie par l'Union européenne, finalisée en 2003 (Parlement européen, 2024), visant à augmenter la concurrence dans le marché de l'énergie, le marché du gaz en Belgique a connu plusieurs évolutions, telles qu'illustrées à la Figure 2.

Avant la libéralisation, le marché du gaz était structuré de manière à ce que l'ensemble du marché soit un monopole : la production, l'importation, le transport, la distribution et la vente étaient liés de façon indissociable. On parlait alors d'une intégration verticale. Toutefois, dans le marché comme on le connaît actuellement, c'est-à-dire libéralisé, une concurrence existe pour l'importation et la fourniture de gaz<sup>2</sup>, les activités de négoce du gaz (la production, l'importation et la vente) sont désormais séparées du transport et de la distribution. Ces derniers demeurent les seules activités en position de monopole. Ce clivage est connu sous le nom du principe d'*unbundling*.

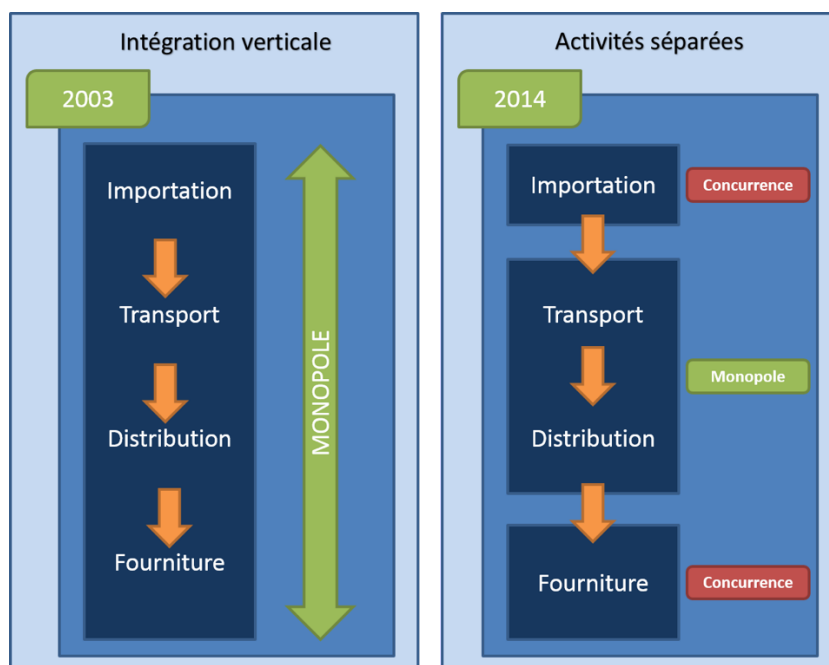


Figure 2 – Évolution du marché de gaz en Belgique (FEBEG, consulté le 15 mars 2024)

<sup>2</sup> Ce mémoire n'examine pas en détail cette partie du marché de gaz. Une liste des entreprises actives dans le shipping de gaz naturel sur le marché belge est disponible en Annexe 1.

## 2.1. Réseau international

La Belgique est un carrefour international pour le gaz naturel. En effet, elle dispose de plusieurs points d'interconnexion frontaliers, comme illustrés sur la Figure 3, qui relient les marchés adjacents : la Norvège, le Royaume-Uni, la France, les Pays-Bas, l'Allemagne et le Luxembourg. Les points d'interconnexion en vert sur la Figure 3 représentent des conduites souterraines ou sous-marines connectées directement aux réseaux de transport des pays voisins.<sup>3</sup> Les points en bleu indiquent des terminaux de gaz naturel liquéfié (GNL), situés à Zeebruges et à Dunkerque<sup>4</sup>.

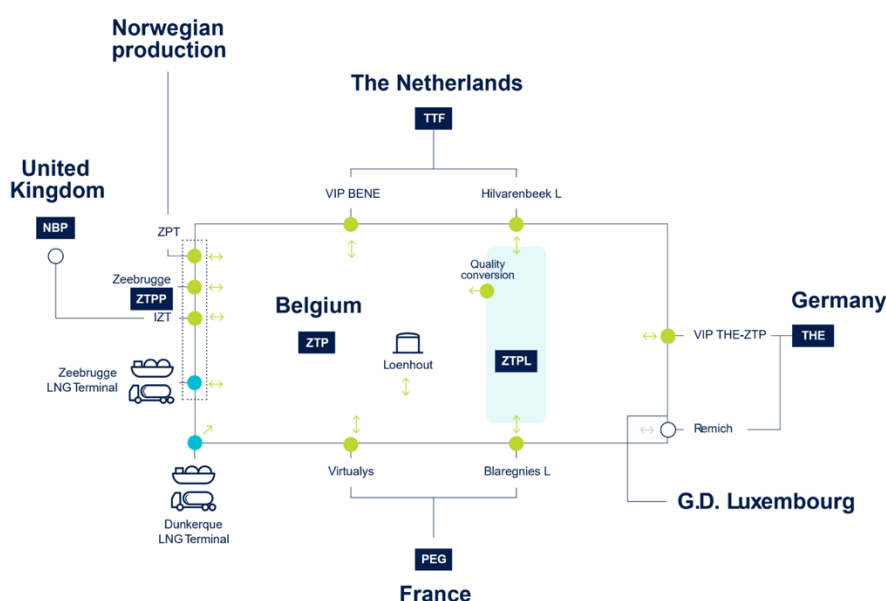


Figure 3 – Points d'interconnexion du réseau de transport de gaz naturel belge (Fluxys, consulté le 15 mars 2024)

Une grande partie du gaz entrant en Belgique est envoyée vers l'un de ces cinq pays. De plus, en 2022, cette proportion a considérablement augmentée suite à une nette diminution des importations de gaz russe en Europe. Selon le *Belgian Energy Data Overview 2024* (SPF Économie, 2024), le flux de gaz circulant en Belgique a subi un changement significatif, passant d'une orientation nord-sud (depuis la Suède et les Pays-Bas vers la France) à une orientation ouest-est (de la Norvège, du Royaume-Uni, de la France et du terminal GNL de Zeebruges vers l'Allemagne et les Pays-Bas). Cette évolution s'est caractérisée par une augmentation

<sup>3</sup> Ces points sont des points virtuels. Chaque point virtuel combine tous les points d'interconnexion physiques qui relient la Belgique avec le même pays et qui ont la même qualité de gaz. Dans ce mémoire, nous distinguerons chaque point d'interconnexion physique, séparément.

<sup>4</sup> Le terminal GNL de Dunkerque est sur le réseau de gaz français, mais il est également relié directement au marché belge via une canalisation (Fluxys, consulté le 23 juillet 2024).

substantielle de la part de gaz entrant en Belgique et transitant vers un pays voisin, atteignant 73% en 2022 contre 50% en 2021. Cette tendance s'est poursuivie en 2023 avec 70% de transit (SPF Économie, consulté le 15 juin 2024)

La Figure 4 montre le réseau de gazoducs sur une partie de l'Europe. Nous pouvons clairement voir que la Belgique est au centre de ce réseau international.



Figure 4 – Le réseau de gaz européen en 2024 (Entsog, 2024)

## 2.2. Transport et distribution

Le monopole du transport de gaz naturel est géré par la société Fluxys Belgium, mentionnée comme « Fluxys » dans la suite de ce mémoire. L'entreprise gère de manière indépendante les infrastructures de gaz naturel à haute pression en Belgique. Elle supervise également la station de stockage de gaz naturel de Loenhout. Sa filiale, Fluxys LNG, exploite le terminal de GNL à Zeebruges.

Fluxys n'est gestionnaire que du réseau de transport. Ce sont des acteurs intermédiaires qui négocient les contrats de transport avec Fluxys afin d'acheminer le gaz jusqu'aux points d'entrée des réseaux de distribution, au nom des fournisseurs. Les réseaux de distribution sont, quant à eux, gérés par des intercommunales.

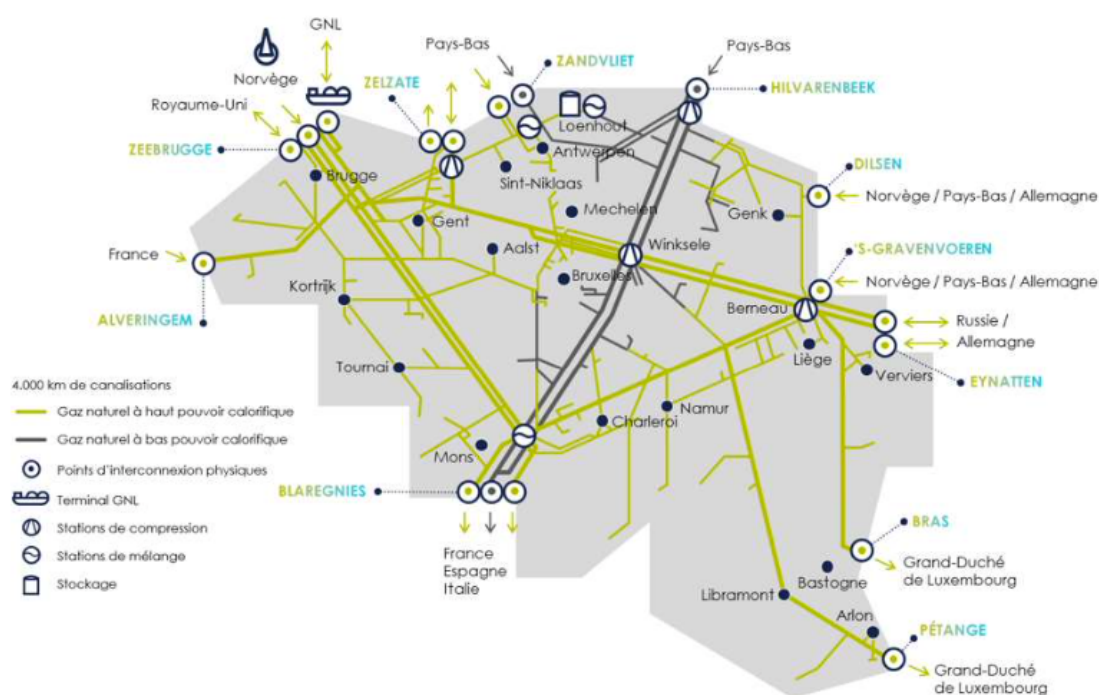


Figure 5 – Réseau de transport physique en Belgique (Fluxys, 2021c)

Le réseau de transport, schématisé dans la Figure 5, s'étend sur l'ensemble du territoire belge et comprend environ 4 000 km de conduites. Il dessert les points d'interconnexion frontaliers mentionnés dans la première section de ce chapitre, ainsi que divers points de connexion au sein du réseau belge. Ces points incluent 17 gestionnaires de réseau de distribution et 230 sites industriels et centrales électriques au gaz (Fluxys, consulté le 26 avril 2024). Le réseau de transport de gaz comporte également des stations de compression situées à

Berneau, Weelde, Winksele et Zelzate<sup>5</sup>. Ces stations de compression sont utilisées pour augmenter la pression du gaz dans les conduites, compensant ainsi les pertes de pression dues aux longues distances entre certains points du réseau. Les compresseurs garantissent également que le gaz atteint la pression minimale requise pour entrer dans le réseau de distribution.

### **2.2.1. Gaz pauvre (L) et gaz riche (H)**

Le SPF Économie (2021a), explique que le réseau de gaz belge fournit deux qualités de gaz distinctes : le gaz L (pour *low*) et le gaz H (pour *High*), également appelés gaz pauvre et gaz riche. La principale différence entre ces deux qualités réside dans leur pouvoir calorifique. Leur composition dépend également de la région du monde d'où provient le gaz.

Le gaz pauvre est un gaz naturel provenant du nord des Pays-Bas, dans la région de Groningen. Il est produit par extraction ou par appauvrissement du gaz riche. On en retrouve également en Allemagne mais en quantités nettement plus petites, et ce pays n'en exporte pas. En revanche, le gaz riche provient de la Mer du Nord ou d'autres régions (Norvège, Russie, Qatar, Etats-Unis...)

En conséquence, le réseau de transport de gaz en Belgique est scindé en deux réseaux exploités de manière distincte : le réseau L, représenté en gris sur la Figure 5, et le réseau H, représenté en vert sur la Figure 5.

### **2.2.2. La fin du gaz pauvre (L)**

En raison de l'épuisement du gisement et des préoccupations concernant l'impact des forages sur la fréquence des tremblements de terre dans la région de Groningen, où le gaz pauvre est extrait, les Pays-Bas ont décidé de cesser progressivement l'exportation de gaz pauvre vers la Belgique entre 2018 et 2029.

Les Pays-Bas étant le seul pays exportateur de gaz pauvre, il a été décidé de convertir progressivement les réseaux de gaz L en réseau de gaz H. Depuis 2016, un programme de conversion des réseaux de transport et de distribution a été mis en place. En conséquence, comme le montre la Figure 6, la part de gaz L consommée en Belgique diminue au profit du

---

<sup>5</sup> N'ayant pas trouvé assez de données pertinentes sur ce compresseur, nous n'allons pas le prendre en compte dans ce mémoire.

gaz H. D'ici fin 2024, l'ensemble du marché belge du gaz naturel devrait être converti au gaz H. Comme le montre la Figure 7, un transit de gaz L en provenance des Pays-Bas vers la France sera cependant maintenu pendant plusieurs années, jusqu'à ce que la conversion du gaz L en gaz H soit achevée en France.

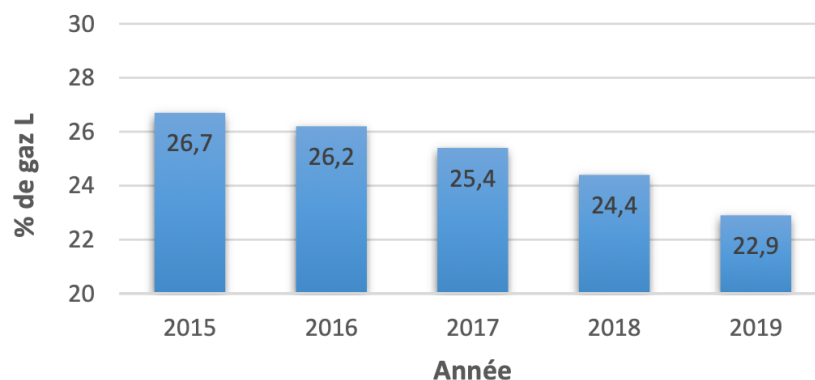


Figure 6 – Proportion de gaz L consommé en Belgique (% par rapport à la consommation totale de gaz naturel consommé) (SPF Économie, 2021a)

Dans ce mémoire, nous analysons le réseau de transport de gaz belge en supposant que tous les réseaux en Europe ont été entièrement convertis au gaz H.

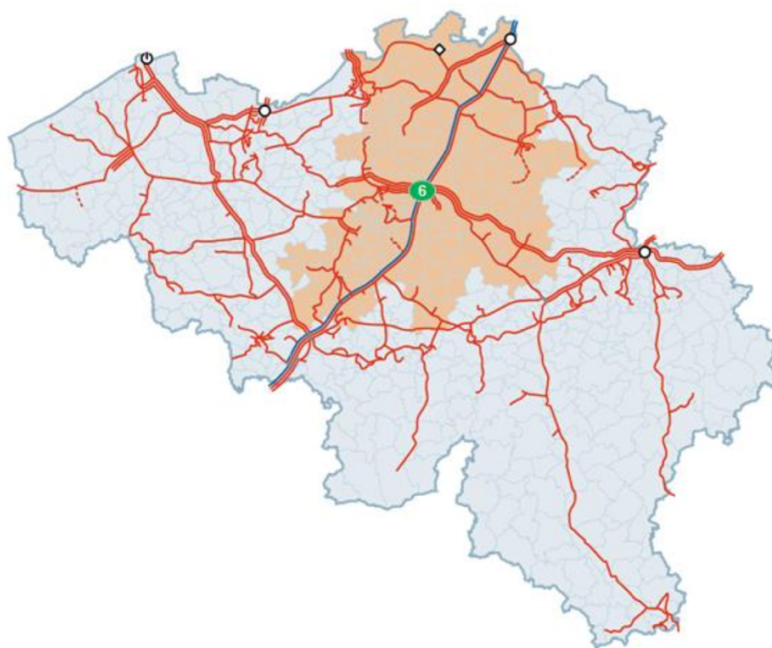


Figure 7 – Adaptation complète du réseau de Fluxys Belgium (réseau L en bleu) (Fluxys, 2021a)

## Chapitre 3. Formulation du problème

### 3.1. Problème principale

Le problème du transport de gaz naturel, analysé ici, peut être formulé mathématiquement comme un problème sur réseau. Un réseau est constitué de *nœuds* et d'*arcs* reliant ceux-ci. Chaque nœud du réseau est caractérisé par la pression du gaz en ce point. On distingue trois types de nœuds : les *nœuds de demande*, les *nœuds d'offre* et les *nœuds d'interconnexion* des gazoducs. Par ailleurs, certains nœuds peuvent remplir à la fois les rôles de demande et d'offre grâce à des espaces de stockage, permettant de récupérer ou d'envoyer du gaz en fonction des besoins.

Les arcs du réseau représentent les gazoducs reliant deux nœuds, qui peuvent correspondre à différentes villes. On distingue deux types d'arcs : les *arcs passifs* et les *arcs actifs*. Les arcs passifs sont des gazoducs simples servant uniquement au transport de gaz. Les arcs actifs, quant à eux, correspondent à des compresseurs, utilisés pour augmenter la pression du gaz à certains points du réseau. À chaque arc est associé une variable représentant le flux de gaz qui le traverse.

Les arcs actifs sont en réalité un peu plus complexes. En effet, pour prendre en compte les changements de pression entre les nœuds  $i$  et  $j$ , lorsqu'un compresseur est placé en fin d'un gazoduc terminant au nœud  $j$ , il faut créer un nœud d'entrée ( $j$ -in) et un nœud de sortie ( $j$ -out) du compresseur. Le gazoduc reliant le nœud précédent le compresseur (nœud  $i$  à la Figure 8) est connecté au nœud d'entrée du compresseur ( $j$ -in), tandis que le nœud suivant le compresseur ( $j$ -out) est connecté au nœud de sortie du gazoduc suivant le compresseur (arc de  $j$ -out à  $k$  dans la Figure 8). Ces deux arcs ( $i, j$ -in) et ( $j$ -out,  $k$ ) sont des arcs passifs, tandis que l'arc actif est l'arc qui relie le nœud d'entrée ( $j$ -in) au nœud de sortie ( $j$ -out). La Figure 8 illustre ce principe :

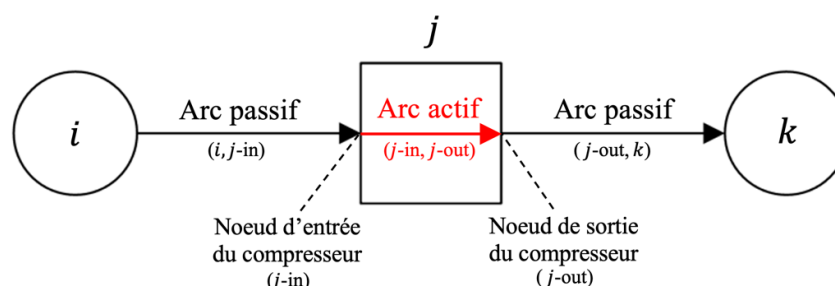


Figure 8 – Arcs actifs

Nous utilisons la notion mathématique de graphe pour représenter le réseau : un graphe est défini comme le couple  $(N, A)$ , où  $N$  est l'ensemble des nœuds et  $A \subseteq N \times N$  est l'ensemble des arcs connectant ces nœuds. L'ensemble des arcs passifs est noté  $A_p$  et l'ensemble des arcs actifs est noté  $A_a$ .

## 3.2. Contraintes

### 3.2.1. Contraintes sur les nœuds

#### 3.2.1.1. Conservation du flux

La première contrainte sur les nœuds est la conservation du flux. Elle garantit que la somme des flux sortants du nœud est égale à la somme des flux entrants dans le nœud et de l'apport net à ce nœud. De Wolf et Smeers (2000), nous illustrent cette contrainte sur la Figure 9 :

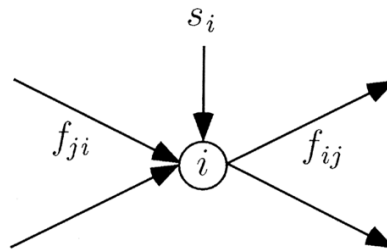


Figure 9 – Conservation du flux

Mathématiquement :

$$\sum_{j|(i,j) \in A} f_{ij} = \sum_{j|(j,i) \in A} f_{ji} + s_i, \quad \forall i \in N \quad (3.1)$$

où  $s_i$  est la quantité nette injectée dans le réseau (si positive) ou livrée à une ville (si négative).

#### 3.2.1.2. Pression minimale et maximale

La deuxième contrainte réside dans le fait que Fluxys ne peut accepter de gaz à une pression plus élevée que celle tolérée au maximum par le réseau (66,2 bars pour les anciennes canalisations, 80 bars pour les nouvelles). À chaque point d'entrée, le fournisseur doit respecter la pression minimale requise par Fluxys. À chaque point de sortie, la demande doit être satisfaite à une pression minimale garantie pour l'utilisateur industriel ou la société de distribution locale.

Mathématiquement :

$$\underline{p}_i \leq p_i \leq \overline{p}_i, \quad \forall i \in N \quad (3.2)$$

où :

$\underline{p}_i$  est la pression minimale au nœud  $i$  ;

$\overline{p}_i$  est la pression maximale au nœud  $i$ .

### 3.2.2. Contraintes sur les arcs

#### 3.2.2.1. Flux de gaz dans les arcs passifs

La première contrainte sur les arcs est la loi physique d'écoulement du gaz. Cette loi relie le flux de gaz dans un gazoduc (dans un arc passif) et la différence de pression entre les extrémités du gazoduc. Elle donne donc les pertes de charges dues à l'écoulement du gaz dans les conduites. De Wolf et Smeers (2000) nous donnent la loi suivante :

$$f_{ij} = \begin{cases} C_{ij} (p_i^2 - p_j^2)^{1/2}, & \text{si } p_i \geq p_j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

où :

$f_{ij}$  est le flux de gaz entre les nœuds  $i$  et  $j$  ;

$C_{ij}$  est une constante qui est fonction de la longueur, du diamètre et de la rugosité de la conduite ainsi que du type de gaz transporté ;

$p_i$  et  $p_j$  sont respectivement les pressions à l'origine et à l'extrémité de l'arc.

Il est important de prendre en compte que, dans le cas de transport de gaz, on utilise des arcs bidirectionnels, c'est-à-dire, que le gaz peut se déplacer dans les deux sens à l'intérieur d'un gazoduc. Si le flux est négatif entre les nœuds  $i$  et  $j$ , on sait alors que le flux se déplace de  $j$  vers  $i$ . Nous pouvons ainsi réécrire la loi mentionnée précédemment de la façon suivante :

$$f_{ij} = \text{sign}(p_i - p_j) C_{ij} |p_i^2 - p_j^2|^{1/2}$$

où  $\text{sign}(x)$  vaut +1 si  $x \geq 0$  et -1 sinon.

Pour obtenir une meilleure séparabilité des variables, nous pouvons la reformuler de cette manière :

$$\text{sign}(f_{ij}) f_{ij}^2 = C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2)$$

Nous allons aller plus loin que cette dernière équation. En effet, lorsqu'il y a une différence de pression entre deux gazoducs qui se rejoignent pour n'en former qu'un seul, un problème survient. Dans cette situation, le mélange de gaz ne se produira pas en raison de cette différence de pression. C'est pourquoi il faut ajouter des valves au système, qui servent à diminuer la pression dans les gazoducs pour que le mélange puisse se faire. Pour prendre en compte ces valves, l'équation devient :

$$f_{ij}^2 \leq \text{sign}(f_{ij}) C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2), \quad \forall (i, j) \in A_p \quad (3.3)$$

L'utilisation du signe  $\leq$  permet de réduire la pression à l'arrivée. Pour illustrer cela, considérons l'exemple présenté dans la Figure 10. Le raisonnement est fait en considérant  $C_{ij}^2 = 1$  et  $C_{kj}^2 = 1$  pour la simplicité des calculs.

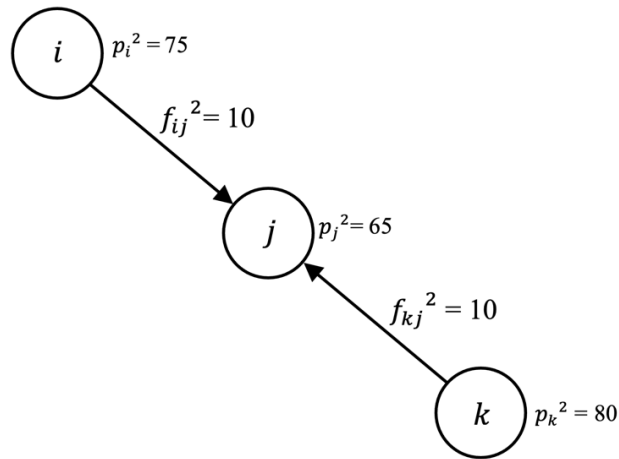


Figure 10 – Exemple valves

Cet exemple montre que si nous avons formulé l'équation avec un signe  $=$ , la pression au carré au nœud  $j$  aurait dû descendre à 65 lorsque le gaz arrive du nœud  $i$ . En revanche, si l'arrivée se fait depuis le nœud  $k$ , la pression au carré au nœud  $j$  aurait dû descendre à 70. Cependant, il est impossible d'avoir deux pressions différentes pour un même nœud. Le réseau prend donc la pression la plus basse. Le signe  $\leq$  assure que, parmi les deux gazoducs, l'un

d'eux réduit sa pression plus que ce que les pertes de charges dans le gazoduc n'imposent. Mathématiquement cela se traduit par :

$$\begin{aligned} f_{ij}^2 &\leq p_i^2 - p_j^2 \\ \Leftrightarrow 10 &\leq 75 - 65 \\ \Leftrightarrow 10 &\leq 10 \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} f_{kj}^2 &\leq p_k^2 - p_j^2 \\ \Leftrightarrow 10 &\leq 80 - 65 \\ \Leftrightarrow 10 &\leq 15 \end{aligned}$$

De plus, en déplaçant le  $\text{sign}(f_{ij})$  de l'autre côté de l'équation, nous nous assurons que, même lorsque le flux est négatif, le côté droit de l'équation soit positif.

### 3.2.2.2. Flux de gaz dans les arcs actifs

Nous avons vu dans le chapitre précédent, qu'il y a maintenant des compresseurs dans le réseau de transport de gaz belge. Bakhouya et De Wolf (2008) nous donnent l'expression de la puissance utilisée par un compresseur :

$$W_{ij} = \gamma_1 f_{ij} \left( \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\gamma_2} - 1 \right), \quad \forall (i, j) \in A_a \quad (3.4)$$

où :

$W_{ij}$  est la puissance utilisée par un compresseur ;

$\gamma_1 = 0,167$  et  $\gamma_2 = 0,236$ , qui sont des constantes spécifiques aux compresseurs.

Notons aussi que  $f_{ij}$ , le flux de gaz entre les nœuds  $i$  et  $j$ , est exprimé en  $m^3$  par heure et la puissance dissipée en  $kW$ .

De plus, chaque compresseur a une puissance maximale qu'il ne peut pas dépasser. De ce fait, la puissance utilisée dans un compresseur doit être inférieure à cette puissance maximale, notée  $\overline{W}_{ij}$ . Nous avons donc :

$$W_{ij} \leq \overline{W}_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A_a \quad (3.5)$$

Ensuite, dans les arcs actifs, la direction du flux est fixée :

$$f_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_a \quad (3.6)$$

Enfin, chaque compresseur a un ratio maximal d'augmentation de la pression. Mathématiquement :

$$p_j \leq \gamma_3 p_i, \quad \forall (i, j) \in A_a \quad (3.7)$$

où  $\gamma_3$ , le ratio maximal d'augmentation de la pression, est une constante spécifique à chaque compresseur variant entre 1,4 (pour les plus anciens compresseurs) et 1,7 (pour les plus récents). Ne disposant pas de cette information, nous utiliserons la valeur moyenne donnée par Bakhouya et De Wolf (2008) de 1,6.

### 3.3. Fonction objectif

Comme il a été expliqué précédemment dans ce mémoire, les activités de négoce et les activités de transport du gaz en Belgique sont gérées séparément. En effet, Fluxys se concentre uniquement sur le transport tandis que d'autres entreprises sont responsables de l'achat et de la revente du gaz. Ici, nous nous positionnons en tant que Fluxys pour analyser les coûts de transport du gaz dans le but de les minimiser. En réalité, les coûts subis par la compagnie de transport, sont les coûts d'utilisation des compresseurs du réseau. De ce fait, la fonction objective est de **minimiser la puissance utilisée dans les compresseurs**.

Cet objectif nous oblige à ajouter un élément à la contrainte (3.5). En effet, il faut imposer une puissance positive afin que le compresseur ne devienne pas un détendeur, ce qui donnerait alors un coût négatif. La contrainte de puissance maximale du compresseur devient :

$$0 \leq W_{ij} \leq \overline{W_{ij}}, \quad \forall (i, j) \in A_a \quad (3.8)$$

Maintenant que nous avons la fonction objective et les contraintes, le problème de transport de gaz peut être formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_{(i,j) \in A_a} W_{ij} \\
 \text{s. c. q.} \quad & \left\{ \begin{array}{ll}
 \sum_{j|(i,j) \in A} f_{ij} = \sum_{j|(j,i) \in A} f_{ji} + s_i & \forall i \in N \\
 f_{ij}^2 \leq \text{sign}(f_{ij}) C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2) & \forall (i,j) \in A_p \\
 W_{ij} = \gamma_1 f_{ij} \left( \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\gamma_2} - 1 \right) & \forall (i,j) \in A_a \\
 \underline{p}_i \leq p_i \leq \overline{p}_i & \forall i \in N \\
 f_{ij} \geq 0 & \forall (i,j) \in A_a \\
 p_j \leq \gamma_3 p_i & \forall (i,j) \in A_a \\
 0 \leq W_{ij} \leq \overline{W}_{ij} & \forall (i,j) \in A_a
 \end{array} \right. \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

### 3.4. Coefficient $C_{ij}$

Pour la contrainte (3.3), nous avons utilisé le coefficient  $C_{ij}$ , une constante qui est fonction de la longueur, du diamètre et de la rugosité de la conduite ainsi que du type de gaz transporté. Pour le calcul précis du coefficient  $C_{ij}$ , on se référera à l'Annexe 2.

Nous n'avons pas encore mentionné le cas d'arcs parallèles. En effet, dans les réseaux de gaz, il arrive fréquemment que lorsque la capacité nécessaire dépasse le diamètre maximum constructible, deux ou trois canalisations soient installées en parallèle. Cela signifie que certains nœuds sont reliés par des gazoducs parallèles. Il existe une méthode pour prendre cela en compte et transformer ces deux ou trois arcs parallèles en un arc unique équivalent. Bakhouya et De Wolf (2008) proposent une méthode pour deux arcs parallèles et nous montrerons comment l'appliquer pour trois arcs parallèles. Le calcul de leur  $C_{ij}$  est expliqué en Annexe 3.

## Chapitre 4. Méthode de résolution du problème

### 4.1. Description et données du réseau belge de transport de gaz

Dans cette première section du chapitre 4, nous nous pencherons sur le deuxième objectif de ce mémoire, soit l'actualisation des données du réseau de transport de gaz belge.

#### 4.1.1. Carte et diagramme du réseau

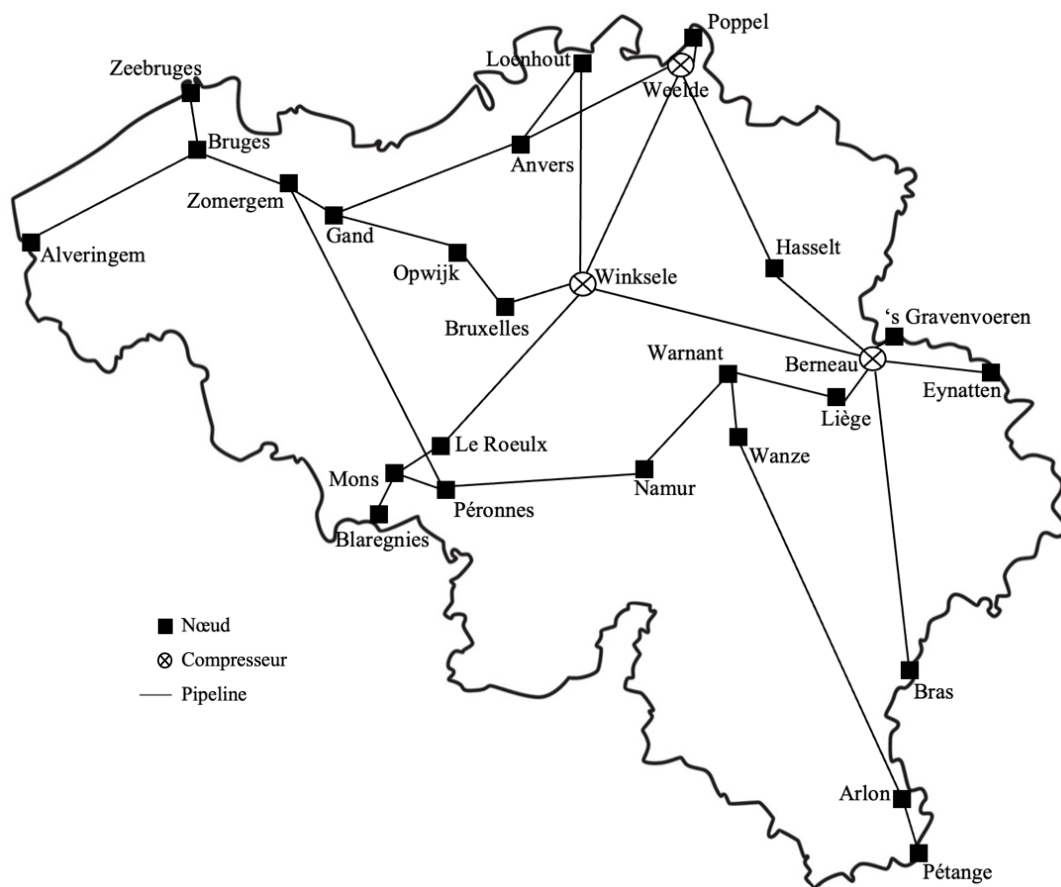


Figure 11 – Réseau belge de transport de gaz à haute pression

Le réseau peut aussi être représenté par un diagramme reprenant tous les gazoducs (voir l'Annexe 4 qui donne la liste des gazoducs et la Figure 15 qui les représentent). Ce diagramme montre les différents nœuds et arcs du réseau. Nous pouvons y voir quels nœuds sont des nœuds d'offre ou de demande, ainsi que l'emplacement des pipelines doubles ou triples.

#### 4.1.1.1. Demande intérieure belge

Le tableau 1 représente la demande totale en gaz en Belgique, pour une année de référence, pour les chefs-lieux des différentes provinces. Il convient de noter que « Bruxelles » englobe la demande des provinces du Brabant wallon et du Brabant flamand, ainsi que de la Région de Bruxelles-Capitale. L'année de référence pour cette demande est 2019, l'année la plus récente pour laquelle des données sont disponibles pour toutes les régions au moment de la rédaction de ce mémoire. Les informations reprises dans ce tableau proviennent des instituts de statistiques de la Région de Bruxelles-Capitale (Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse, 2024), de la Région wallonne (Institut Wallon de l'Évaluation, de la Prospective et de la Statistique, 2024), ainsi que du gestionnaire de réseau pour la Région flamande, Fluvius (2022).

| Province  | Demande<br>[10 <sup>6</sup> GJ] | Pourcentage |
|-----------|---------------------------------|-------------|
| Antwerpen | 82,470                          | 22,764 %    |
| Arlon     | 2,849                           | 0,786 %     |
| Brugge    | 49,371                          | 13,628 %    |
| Bruxelles | 72,589                          | 20,036 %    |
| Gent      | 47,486                          | 13,107 %    |
| Hasselt   | 22,473                          | 6,203 %     |
| Liège     | 27,062                          | 7,470 %     |
| Mons      | 46,154                          | 12,740 %    |
| Namur     | 11,833                          | 3,266 %     |
| Total     | 362,287                         | 100,000 %   |

Tableau 1 – Demande de gaz en Belgique pour l'année 2019

Dans notre modèle, nous considérons les quantités de gaz en millions de  $m^3/jour$ . Il est donc nécessaire de modifier les données afin d'obtenir les demandes journalières pour chaque province. Afin d'être le plus précis possible et de vérifier que le réseau peut subvenir aux demandes maximales, nous n'allons pas simplement diviser les données annuelles par le nombre de jours par an, soit 365. Nous allons utiliser le record absolu de consommation journalière de gaz naturel par les habitants en Belgique. Selon Belga (2022), c'est le 3 février 2012 que ce record de consommation a été atteint, avec 1165 GWh consommés. Pour avoir la quantité de gaz en mètre cube, il faut diviser ce nombre par le pouvoir calorifique du gaz, soit 0,041840 GJ/ $m^3$ . Nous obtenons alors une consommation de **100,239 x 10<sup>6</sup>  $m^3/jour$** . Pour

calculer la demande par province en Belgique le 3 février 2012, nous allons utiliser les pourcentages du tableau 1. Les résultats sont repris dans le tableau 2.

| Province  | Demande<br>[ $10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ ] | Pourcentage |
|-----------|-----------------------------------------------|-------------|
| Antwerpen | 22,818                                        | 22,764 %    |
| Arlon     | 0,788                                         | 0,786 %     |
| Brugge    | 13,66                                         | 13,628 %    |
| Bruxelles | 20,084                                        | 20,036 %    |
| Gent      | 13,139                                        | 13,107 %    |
| Hasselt   | 6,218                                         | 6,203 %     |
| Liège     | 7,488                                         | 7,470 %     |
| Mons      | 12,77                                         | 12,740 %    |
| Namur     | 3,274                                         | 3,266 %     |
| Total     | 100,239                                       | 100,000 %   |

*Tableau 2 – Demande journalière maximum de gaz en Belgique*

#### 4.1.1.2. Stockage

Comme mentionné au chapitre 2, le réseau de gaz en Belgique comprend un espace de stockage à Loenhout. Fluxys (consulté le 26 avril 2024) indique que sa capacité d'émission (également appelée capacité de déstockage) est de  $7,25 \text{ GWh/heure}$ . Puisque nous travaillons en million de  $\text{m}^3/\text{jour}$  dans ce mémoire, il est nécessaire de convertir cette donnée. Nous convertissons d'abord  $7,25 \text{ GWh/heure}$  en  $\text{GJ/jour}$ , ce qui donne  $626\,400 \text{ GJ/jour}$ . Pour obtenir la capacité de déstockage en  $\text{m}^3/\text{jour}$ , nous devons diviser ce nombre par le pouvoir calorifique du gaz, soit  $0,041840 \text{ GJ/m}^3$ . Nous obtenons alors une capacité de déstockage de  $14,971 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ .

#### 4.1.1.3. Demande et offre étrangère depuis et vers la Belgique

Il est compliqué d'avoir des données exactes quant à l'importation et à l'exportation de gaz naturel vers et depuis la Belgique. En effet, des données concernant l'origine et/ou la destination réelle du gaz transporté à travers le réseau belge sont accessibles pour certains pays, comme la Norvège, les Pays-Bas et la France mais cela n'est pas le cas pour l'ensemble du gaz.<sup>6</sup> De plus,

---

<sup>6</sup> « Cela résulte de la dépendance croissante vis-à-vis des contrats à court terme et du marché au comptant, ainsi que du fait que les sociétés de négoce de gaz ne suivent pas les molécules de gaz réelles qu'elles échangent, mais plutôt les pays avec lesquels elles ont des accords contractuels. » (SPF Économie, 2021b)

les différents organismes<sup>7</sup> publiant ces données n'utilisent pas les mêmes méthodologies de calculs pour obtenir ces résultats. Nous avons donc décidé d'utiliser les données fournies par le SPF Économie pour toutes les données d'importation de la Belgique utilisées dans ce mémoire.

Pour déterminer les quantités de gaz importées en Belgique et leur provenance, nous avons d'abord repris les origines du gaz consommé en Belgique pour les années 2019, 2021 et 2022. Nous avons choisi de ne pas inclure l'année 2020 dans nos calculs, car celle-ci n'est pas représentative en raison de la pandémie de Covid-19. Les données pour les années 2019, 2021 et 2022 sont présentées dans les tableaux 3, 4 et 5.

Bien que les Pays-Bas et la Russie sont mentionnés parmi les données, les importations de gaz en provenance de ces deux pays ont cessé ou vont bientôt cesser. Il a donc été nécessaire de redistribuer les parts des quantités de gaz importées en Belgique sans tenir compte des Pays-Bas et de la Russie en faisant l'hypothèse que les parts relatives des fournisseurs restants sont inchangées.

| Importations en 2019<br>venant de | Part  | Sans P-B et<br>RUS | Redistribution |
|-----------------------------------|-------|--------------------|----------------|
| Pays-Bas                          | 42 %  |                    |                |
| Norvège                           | 37 %  | 37 %               | 66 %           |
| Qatar                             | 9 %   | 9 %                | 16 %           |
| Royaume-Uni                       | 6 %   | 6 %                | 11 %           |
| Autres (dont France)              | 4 %   | 4 %                | 7 %            |
| Russie                            | 3 %   |                    |                |
| Total                             | 101 % | 56 %               | 100 %          |

Tableau 3 – Origine du gaz consommés en Belgique en 2019 (SPF Économie, 2021b)

| Importations en 2021<br>venant de | Part   | Sans P-B et<br>RUS | Redistribution |
|-----------------------------------|--------|--------------------|----------------|
| Pays-Bas                          | 14,3 % |                    |                |
| Norvège                           | 57,2 % | 57,2 %             | 78 %           |
| Qatar                             | 12,2 % | 12,2 %             | 17 %           |
| Royaume-Uni                       | 1,5 %  | 1,5 %              | 2 %            |
| USA                               | 0,7 %  | 0,7 %              | 1 %            |
| Autre (dont France)               | 2,1 %  | 2,1 %              | 3 %            |
| Russie                            | 11,9 % |                    |                |
| Total                             | 100 %  | 73,7 %             | 100 %          |

Tableau 4 - Origine du gaz consommés en Belgique en 2021 (FEBEG, 2022)

---

<sup>7</sup> Par exemple : SPF Économie, CREG, Eurostat, ENTSOG

| Importations en 2022<br>venant de | Part   | Sans P-B et<br>RUS | Redistribution |
|-----------------------------------|--------|--------------------|----------------|
| Pays-Bas                          | 13,0 % |                    |                |
| Norvège                           | 60,9 % | 60,9 %             | 72 %           |
| Qatar                             | 5,9 %  | 5,9 %              | 7 %            |
| Royaume-Uni                       | 9,3 %  | 9,3 %              | 11 %           |
| Autres (dont USA)                 | 4,7 %  | 4,7 %              | 6 %            |
| France                            | 3,6 %  | 3,6 %              | 4 %            |
| Russie                            | 2,8 %  |                    |                |
| Total                             | 100 %  | 84,4 %             | 100 %          |

Tableau 5 - Origine du gaz consommés en Belgique en 2022 (SPF Économie, 2023)

Grâce à ces redistributions, nous pouvons maintenant estimer l'offre journalière des pays fournisseurs. Premièrement, pour obtenir le pourcentage estimé, nous calculons une simple moyenne de ces redistributions. Ensuite, en utilisant la demande totale pour la Belgique, nous déterminons l'offre totale pour la Belgique, puisque les deux sont égales. Nous avons donc une offre journalière totale de gaz pour la Belgique de 100,239 millions de  $m^3/jour$ . En plus des quantités fournies par les pays étrangers, il ne faut pas oublier de prendre en compte la capacité de déstockage, calculée dans la section précédente. L'offre journalière de gaz en Belgique est disponible dans le tableau 6.

| Fournisseurs | Pourcentage<br>estimé | Offre<br>[ $10^6 m^3/jour$ ] |
|--------------|-----------------------|------------------------------|
| Déstockage   |                       | 14,971                       |
| Norvège      | 71,29 %               | 60,785                       |
| Qatar        | 12,87 %               | 10,975                       |
| Royaume-Uni  | 7,92 %                | 6,754                        |
| Autres       | 2,97 %                | 2,533                        |
| France       | 4,95 %                | 4,221                        |
| Total        | 100,00 %              | 100,239                      |

Tableau 6 - Offre journalière de gaz en Belgique

Comme mentionné plus haut, la Belgique fournit également du gaz à certains de ses voisins. Selon le SPF Économie (2021b), en 2019, la Belgique a exporté du gaz L et H vers la France, ainsi que du gaz H vers le Luxembourg. Les quantités sont disponibles dans le tableau 7. Notons qu'ici, ne disposant pas des chiffres pour 2021 et 2022, nous nous sommes uniquement basés sur les chiffres de 2019.

| Pays       | Gaz L sortant<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jour] | Gaz H sortant<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jour] | Demande totale<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jour] |
|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| France     | 3,77                                                    | 9,64                                                    | 13,41                                                    |
| Luxembourg |                                                         | 0,66                                                    | 0,66                                                     |

Tableau 7 – Demande étrangère journalière de gaz venant de Belgique

#### 4.1.1.4. Puissance des compresseurs

Enfin, pour les données de puissance maximale des compresseurs, le site de la Région flamande (consulté le 30 avril 2024) et une étude de la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG, 2008) fournissent les informations présentées dans le tableau 8.

| Compresseur | Puissance maximale<br>[kW] |
|-------------|----------------------------|
| Berneau     | 20888                      |
| Weelde      | 158489                     |
| Winksele    | 107357                     |

Tableau 8 – Puissance maximale des compresseurs

#### 4.1.1.5. Tableaux récapitulatifs des nœuds et des gazoducs

Une précision s'impose concernant les nœuds qui représentent des compresseurs. Comme expliqué au début du chapitre 3, chaque compresseur possède un nœud d'entrée (*j*-in) et un nœud de sortie (*j*-out). Par conséquent, pour chaque compresseur, les nœuds sont dédoublés. Ces nœuds associés à chaque compresseur ont les mêmes caractéristiques, notamment les pressions minimales et maximales, ainsi que leurs mesures.

Une description des hypothèses et des sources concernant les points d'approvisionnement, la répartition des offres et des demandes sur les nœuds, ainsi que les pressions minimales et maximales, est disponible en Annexe 5.

| Nœud | Ville           | $s_i$<br>[ $10^6 m^3$ ] | $\underline{p_i}$<br>[bar] | $\overline{p_i}$<br>[bar] |
|------|-----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1    | Zeebruges       | 58,537                  | 55                         | 80                        |
| 2    | Bruges          | -13,660                 | 30                         | 80                        |
| 3    | Zomergem        | 0,0                     | 0                          | 80                        |
| 4    | Loenhout        | 14,971                  | 60                         | 80                        |
| 5    | Anvers          | -22,818                 | 30                         | 80                        |
| 6    | Gand            | -13,139                 | 30                         | 80                        |
| 7    | 's Gravenvoeren | 14,756                  | 49                         | 66,2                      |
| 8    | Berneau-IN      | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 9    | Berneau-OUT     | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 10   | Liège           | -7,488                  | 30                         | 66,2                      |
| 11   | Warnant         | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 12   | Namur           | -3,274                  | 30                         | 66,2                      |
| 13   | Péronnes        | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 14   | Mons            | -12,770                 | 30                         | 66,2                      |
| 15   | Blaregnies      | -13,410                 | 49                         | 66,2                      |
| 16   | Wanze           | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 17   | Arlon           | -0,788                  | 30                         | 66,2                      |
| 18   | Pétange         | -0,180                  | 27                         | 66,2                      |
| 19   | Poppel          | 19,291                  | 49                         | 66,2                      |
| 20   | Weelde-IN       | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 21   | Weelde-OUT      | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 22   | Winksele-IN     | 0,0                     | 0                          | 80                        |
| 23   | Winksele-OUT    | 0,0                     | 0                          | 80                        |
| 24   | Le Rœulx        | 0,0                     | 0                          | 66,2                      |
| 25   | Bruxelles       | -20,084                 | 30                         | 66,2                      |
| 26   | Eynatten        | 2,533                   | 55                         | 80                        |
| 27   | Opwijk          | 0,0                     | 0                          | 80                        |
| 28   | Alveringem      | 4,221                   | 55                         | 84,5                      |
| 29   | Hasselt         | -6,218                  | 30                         | 66,2                      |
| 30   | Bras            | -0,480                  | 27                         | 66,2                      |

Tableau 9 – Description des nœuds du réseau

| Arc | De              | À            | Diamètre<br>[mm] | Longueur<br>[km] | $C_{ij}^2$  | $C_{ij}^2$<br>équivalent |
|-----|-----------------|--------------|------------------|------------------|-------------|--------------------------|
| 1   | Zeebruges       | Bruges       | 890              | 10               | 3,628109979 | 14,51243992              |
| 2   | Zeebruges       | Bruges       | 890              | 10               | 3,628109979 |                          |
| 3   | Bruges          | Zomergem     | 890              | 26               | 1,395426915 | 1,39542691               |
| 4   | Loenhout        | Anvers       | 590,1            | 43               | 0,100255861 | 0,10025586               |
| 5   | Anvers          | Gand         | 590,1            | 29               | 0,148655242 | 0,14865524               |
| 6   | Gand            | Zomergem     | 590,1            | 19               | 0,226894844 | 12,05436956              |
| 7   | Gand            | Zomergem     | 1200             | 19               | 8,973652399 |                          |
| 8   | Zomergem        | Péronnes     | 890              | 55               | 0,659656360 | 0,65965636               |
| 9   | 's Gravenvoeren | Berneau-IN   | 890              | 5                | 7,256219958 | 9,13503213               |
| 10  | 's Gravenvoeren | Berneau-IN   | 395,5            | 5                | 0,108033431 |                          |
| 11  | Berneau-OUT     | Liège        | 890              | 20               | 1,814054989 | 2,28375803               |
| 12  | Berneau-OUT     | Liège        | 395,5            | 20               | 0,027008358 |                          |
| 13  | Liège           | Warnant      | 890              | 25               | 1,451243992 | 1,82700643               |
| 14  | Liège           | Warnant      | 395,5            | 25               | 0,021606686 |                          |
| 15  | Warnant         | Namur        | 890              | 42               | 0,863835709 | 0,86383571               |
| 16  | Namur           | Péronnes     | 890              | 45               | 0,806246662 | 0,80624666               |
| 17  | Péronnes        | Mons         | 890              | 10               | 3,628109979 | 3,62810998               |
| 18  | Mons            | Blaregnies   | 890              | 13               | 2,790853830 | 11,16341532              |
| 19  | Mons            | Blaregnies   | 890              | 13               | 2,790853830 |                          |
| 20  | Warnant         | Wanze        | 395,5            | 10,5             | 0,051444491 | 0,05144449               |
| 21  | Wanze           | Arlon        | 315,5            | 124              | 0,001346081 | 0,00134608               |
| 22  | Arlon           | Pétange      | 315,5            | 6                | 0,027819000 | 0,02781900               |
| 23  | Poppel          | Weelde-IN    | 890              | 6                | 6,046849965 | 54,42164968              |
| 24  | Poppel          | Weelde-IN    | 890              | 6                | 6,046849965 |                          |
| 25  | Poppel          | Weelde-IN    | 890              | 6                | 6,046849965 |                          |
| 26  | Weelde-OUT      | Winksele-IN  | 890              | 71               | 0,511001405 | 2,04400562               |
| 27  | Weelde-OUT      | Winksele-IN  | 890              | 71               | 0,511001405 |                          |
| 28  | Winksele-OUT    | Le Rœulx     | 890              | 65               | 0,558170766 | 2,23268306               |
| 29  | Winksele-OUT    | Le Rœulx     | 890              | 65               | 0,558170766 |                          |
| 30  | Le Rœulx        | Mons         | 890              | 14               | 2,591507128 | 10,36602851              |
| 31  | Le Rœulx        | Mons         | 890              | 14               | 2,591507128 |                          |
| 32  | Weelde-OUT      | Anvers       | 590,1            | 46               | 0,093717435 | 0,37486974               |
| 33  | Weelde-OUT      | Anvers       | 590,1            | 46               | 0,093717435 |                          |
| 34  | Weelde-OUT      | Hasselt      | 590,1            | 65               | 0,066323108 | 0,06632311               |
| 35  | Berneau-OUT     | Hasselt      | 590,1            | 40               | 0,107775051 | 0,10777505               |
| 36  | Eynatten        | Berneau-IN   | 1000             | 38               | 1,745910712 | 11,83044999              |
| 37  | Eynatten        | Berneau-IN   | 1200             | 38               | 4,486826200 |                          |
| 38  | Berneau-OUT     | Winksele-IN  | 1000             | 90               | 0,737162301 | 4,99507888               |
| 39  | Berneau-OUT     | Winksele-IN  | 1200             | 90               | 1,894437729 |                          |
| 40  | Winksele-OUT    | Bruxelles    | 1000             | 21               | 3,159267002 | 21,40748093              |
| 41  | Winksele-OUT    | Bruxelles    | 1200             | 21               | 8,119018837 |                          |
| 42  | Bruxelles       | Opwijk       | 1000             | 24               | 2,764358627 | 18,73154582              |
| 43  | Bruxelles       | Opwijk       | 1200             | 24               | 7,104141483 |                          |
| 44  | Opwijk          | Gand         | 1000             | 40               | 1,658615176 | 11,23892749              |
| 45  | Opwijk          | Gand         | 1200             | 40               | 4,262484890 |                          |
| 46  | Berneau-OUT     | Bras         | 500              | 100              | 0,018248422 | 0,01824842               |
| 47  | Alveringem      | Bruges       | 900              | 74               | 0,519499930 | 0,51949993               |
| 48  | Winksele-OUT    | Loenhout     | 900              | 80               | 0,480537436 | 0,48053744               |
| 49  | Berneau-IN      | Berneau-OUT  | /                | /                | /           | /                        |
| 50  | Weelde-IN       | Weelde-OUT   | /                | /                | /           | /                        |
| 51  | Winksele-IN     | Winksele-OUT | /                | /                | /           | /                        |

Tableau 10 –Description des gazoducs du réseau

## 4.2. Problème auxiliaire

Le problème développé au chapitre 3 est trop complexe pour être résolu directement en raison de la non-convexité de la contrainte (3.3), ce qui peut impliquer l'existence de plusieurs optimums locaux et rend difficile la recherche de l'optimum global. De plus, la modélisation des compresseurs (3.4) rend le problème non séparable, ce qui complique encore la situation. Il est donc crucial de trouver un bon point de départ pour que le programme puisse identifier une solution optimale pertinente.

Bakhouya et De Wolf (2008) proposent de résoudre successivement deux problèmes, le premier servant de point de départ pour le second. Ce premier problème est formulé en relâchant les contraintes de pression et en éliminant tous les compresseurs du modèle complet (3.9). Mathématiquement :

$$\begin{aligned} \min H = & \sum_{(i,j) \in A} \frac{|f_{ij}| f_{ij}^2}{3C_{ij}^2} \\ \text{s. c. q.} \quad & \sum_{j|(i,j) \in A} f_{ij} = \sum_{j|(j,i) \in A} f_{ji} + s_i \quad \forall i \in N \end{aligned} \tag{4.1}$$

La fonction objectif de ce problème auxiliaire est l'énergie mécanique dissipée par unité de temps dans les gazoducs (voir De Wolf, 2017). Bakhouya et De Wolf (2008) montrent que le point obtenu en minimisant l'énergie mécanique dissipée dans les canalisations devrait constituer un bon point de départ pour le problème complet. De plus, étant donné que le problème est strictement convexe en ce qui concerne les variables de flux ( $f_{ij}$ ), sa solution optimale est unique et facile à calculer pour n'importe quel solveur non linéaire.

## 4.3. Résultats

### 4.3.1. Problème auxiliaire

Les résultats de ce problème ne servent que de point de départ, nous ne les analyserons donc pas en détail. Cependant, le problème auxiliaire nous indique les sens des flux de gaz dans les compresseurs, que nous fixons ensuite pour faciliter la résolution du problème principal.

### 4.3.2. Problème principal

Grâce au point de départ fourni par le problème auxiliaire, le programme de modélisation mathématique peut désormais nous donner la solution optimale. Le tableau 11 présente les flux optimaux dans les gazoducs entre les différents nœuds, tandis que le tableau 12 montre les pressions ainsi que les quantités fournies ou distribuées dans le réseau.

La valeur optimale, minimale dans notre modèle, de la puissance utilisée dans les compresseurs est de 0,000 *kW*.

### 4.3.1. Analyse des résultats

L'objectif de l'optimisation dans ce modèle est de minimiser la puissance utilisée par les compresseurs pour le transport de gaz dans le réseau belge. Comme mentionnée ci-dessus, la valeur optimale trouvée pour la puissance est de 0,000 *kW*. Cela signifie que le modèle optimisé n'indique aucun besoin en puissance de compression pour maintenir le flux à travers le réseau. Cette valeur peut également être vérifiée en examinant les pressions aux points d'entrée et de sortie de chaque compresseur. Nous constatons que pour les trois compresseurs du réseau, les pressions aux points d'entrée et de sortie sont identiques. Cela confirme **qu'aucune compression n'a eu lieu dans le réseau.**

De plus, les pressions à la sortie des nœuds dans le tableau 12, sont généralement proches de pressions maximale admissibles pour chaque nœud. Par exemple, la pression à Zeebruges est de 68,267 bar, alors que la pression maximale est de 80 bar, ce qui laisse une marge significative. De même, la pression pour Bruxelles est de 50,287 bar, alors que la pression maximale est de 66,2 bar. Ces valeurs montrent que les pressions dans le réseau sont bien gérées, ce qui peut contribuer à l'absence de besoin de compression.

Enfin, nous constatons que le modèle satisfait bien les quantités demandées dans les différentes villes. Cependant, cela était attendu, puisque nous avons imposé au modèle de respecter les quantités de demande et d'offre en fixant  $s_i$ , la quantité nette injectée dans le réseau (si positive) ou livrée à une ville (si négative), comme un paramètre plutôt qu'une variable. Ces résultats montrent simplement que le modèle fournit des données cohérentes avec les contraintes imposées.

| De              | À            | Flux<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|--------------|-------------------------------------------|
| Zeebruges       | Bruges       | 58,5370                                   |
| Bruges          | Zomergem     | 49,0980                                   |
| Loenhout        | Anvers       | 11,7662                                   |
| Gand            | Anvers       | 3,2676                                    |
| Zomergem        | Gand         | 36,4926                                   |
| Zomergem        | Péronnes     | 12,6054                                   |
| 's Gravenvoeren | Berneau-IN   | 14,7560                                   |
| Berneau-OUT     | Liège        | 10,9797                                   |
| Liège           | Warnant      | 3,4917                                    |
| Warnant         | Namur        | 2,5237                                    |
| Péronnes        | Namur        | 0,7503                                    |
| Péronnes        | Mons         | 11,8551                                   |
| Mons            | Blaregnies   | 13,4100                                   |
| Warnant         | Wanze        | 0,9680                                    |
| Wanze           | Arlon        | 0,9680                                    |
| Arlon           | Pétange      | 0,1800                                    |
| Poppel          | Weelde-IN    | 19,2910                                   |
| Weelde-OUT      | Winksele-IN  | 8,3967                                    |
| Winksele-OUT    | Le Rœulx     | 14,3249                                   |
| Le Rœulx        | Mons         | 14,3249                                   |
| Weelde-OUT      | Anvers       | 7,7842                                    |
| Weelde-OUT      | Hasselt      | 3,1101                                    |
| Berneau-OUT     | Hasselt      | 3,1079                                    |
| Eynatten        | Berneau-IN   | 2,5330                                    |
| Berneau-OUT     | Winksele-IN  | 2,7214                                    |
| Winksele-OUT    | Bruxelles    | -0,0020                                   |
| Opwijk          | Bruxelles    | 20,086                                    |
| Gand            | Opwijk       | 20,086                                    |
| Berneau-OUT     | Bras         | 0,480                                     |
| Alveringem      | Bruges       | 4,221                                     |
| Loenhout        | Winksele-OUT | 3,2048                                    |
| Berneau-IN      | Berneau-OUT  | 17,2890                                   |
| Weelde-IN       | Weelde-OUT   | 19,2910                                   |
| Winksele-IN     | Winksele-OUT | 11,1181                                   |

Tableau 11 – Flux minimisant l'utilisation des compresseurs dans le réseau

| Nœud | Ville           | Fourniture/livraison<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ] | Pression<br>[bar] | Pression max<br>[bar] |
|------|-----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 1    | Zeebruges       | 58,537                                                    | 68,267            | 80                    |
| 2    | Bruges          | -13,660                                                   | 66,515            | 80                    |
| 3    | Zomergem        | 0,0                                                       | 51,930            | 80                    |
| 4    | Loenhout        | 14,971                                                    | 60,000            | 80                    |
| 5    | Anvers          | -22,818                                                   | 30,000            | 80                    |
| 6    | Gand            | -13,139                                                   | 50,855            | 80                    |
| 7    | 's Gravenvoeren | 14,756                                                    | 51,605            | 66,2                  |
| 8    | Berneau-IN      | 0,0                                                       | 51,373            | 66,2                  |
| 9    | Berneau-OUT     | 0,0                                                       | 51,373            | 66,2                  |
| 10   | Liège           | -7,488                                                    | 40,348            | 66,2                  |
| 11   | Warnant         | 0,0                                                       | 40,265            | 66,2                  |
| 12   | Namur           | -3,274                                                    | 40,174            | 66,2                  |
| 13   | Péronnes        | 0,0                                                       | 49,556            | 66,2                  |
| 14   | Mons            | -12,770                                                   | 49,164            | 66,2                  |
| 15   | Blaregnies      | -13,410                                                   | 49,000            | 66,2                  |
| 16   | Wanze           | 0,0                                                       | 39,951            | 66,2                  |
| 17   | Arlon           | -0,788                                                    | 30,000            | 66,2                  |
| 18   | Pétange         | -0,180                                                    | 27,000            | 66,2                  |
| 19   | Poppel          | 19,291                                                    | 51,713            | 66,2                  |
| 20   | Weelde-IN       | 0,0                                                       | 51,647            | 66,2                  |
| 21   | Weelde-OUT      | 0,0                                                       | 51,647            | 66,2                  |
| 22   | Winksele-IN     | 0,0                                                       | 50,287            | 80                    |
| 23   | Winksele-OUT    | 0,0                                                       | 50,287            | 80                    |
| 24   | Le Rœulx        | 0,0                                                       | 49,365            | 66,2                  |
| 25   | Bruxelles       | -20,084                                                   | 50,287            | 66,2                  |
| 26   | Eynatten        | 2,533                                                     | 55,000            | 80                    |
| 27   | Opwijk          | 0,0                                                       | 50,501            | 80                    |
| 28   | Alveringem      | 4,221                                                     | 67,460            | 84,5                  |
| 29   | Hasselt         | -6,218                                                    | 30,000            | 66,2                  |
| 30   | Bras            | -0,480                                                    | 27,700            | 66,2                  |

Tableau 12 – Pressions et quantités fournies/délivrées optimales dans le réseau

Nous pouvons conclure que le modèle nous donne des résultats plausibles et indique que le design du réseau est conçu de manière efficace par Fluxys, le gestionnaire du réseau. Toutefois, il convient de noter que de nombreuses hypothèses (voir Annexes 4 et 5) ont été faites lors de la construction de ce modèle et de ses données. Il serait donc pertinent de comparer ces résultats avec les données réelles du réseau de transport de gaz belge pour valider la précision du modèle.

#### 4.3.1.1. Analyse des valves du réseau

Dans le modèle proposé par De Wolf et Smeers (2000), nous avons modifié la contrainte sur la loi physique d'écoulement du gaz en y ajoutant des valves, servant à diminuer la pression dans les gazoducs. Pour rappel, l'équation finale donnait ceci :

$$f_{ij}^2 \leq \text{sign}(f_{ij}) C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2), \quad \forall (i, j) \in A_p \quad (3.3)$$

Dans notre modèle présenté plus haut, les emplacements des valves ne sont pas contraints, ce qui signifie qu'il y a potentiellement des valves partout sur le réseau. Cependant, il serait intéressant d'analyser où le modèle utilise des valves et d'en comprendre la raison. GAMS nous renvoie le tableau 13 comme données pour la contrainte (3.3). A noter que les arcs non présents dans le tableau ont des résultats égal à 0 ou une valeur si petite qu'elle peut être négligée. De plus, la Figure 12 montre en rouge les arcs qui utilisent une valve.

| Arc    | De          | À            | Résultat<br>contrainte (3.3) |
|--------|-------------|--------------|------------------------------|
| 4      | Loenhout    | Anvers       | -132,2480                    |
| 5      | Gand        | Anvers       | -239,9923                    |
| 11, 12 | Berneau-OUT | Liège        | -2188,8272                   |
| 16     | Péronnes    | Namur        | -678,2288                    |
| 20     | Warnant     | Wanze        | -0,3589                      |
| 22     | Arlon       | Pétange      | -4,7246                      |
| 26, 27 | Weelde-OUT  | Winksele-IN  | -212,7488                    |
| 32, 33 | Weelde-OUT  | Anvers       | -601,9472                    |
| 34     | Weelde-OUT  | Hasselt      | -107,5461                    |
| 35     | Berneau-OUT | Hasselt      | -177,7829                    |
| 36, 37 | Eynatten    | Berneau-IN   | -4557,8108                   |
| 38, 39 | Berneau-OUT | Winksele-IN  | -543,9712                    |
| 46     | Berneau-OUT | Bras         | -33,9289                     |
| 47     | Alveringem  | Bruges       | -47,9593                     |
| 48     | Loenhout    | Winksele-OUT | -504,4747                    |

Tableau 13 – Résultats contrainte des valves

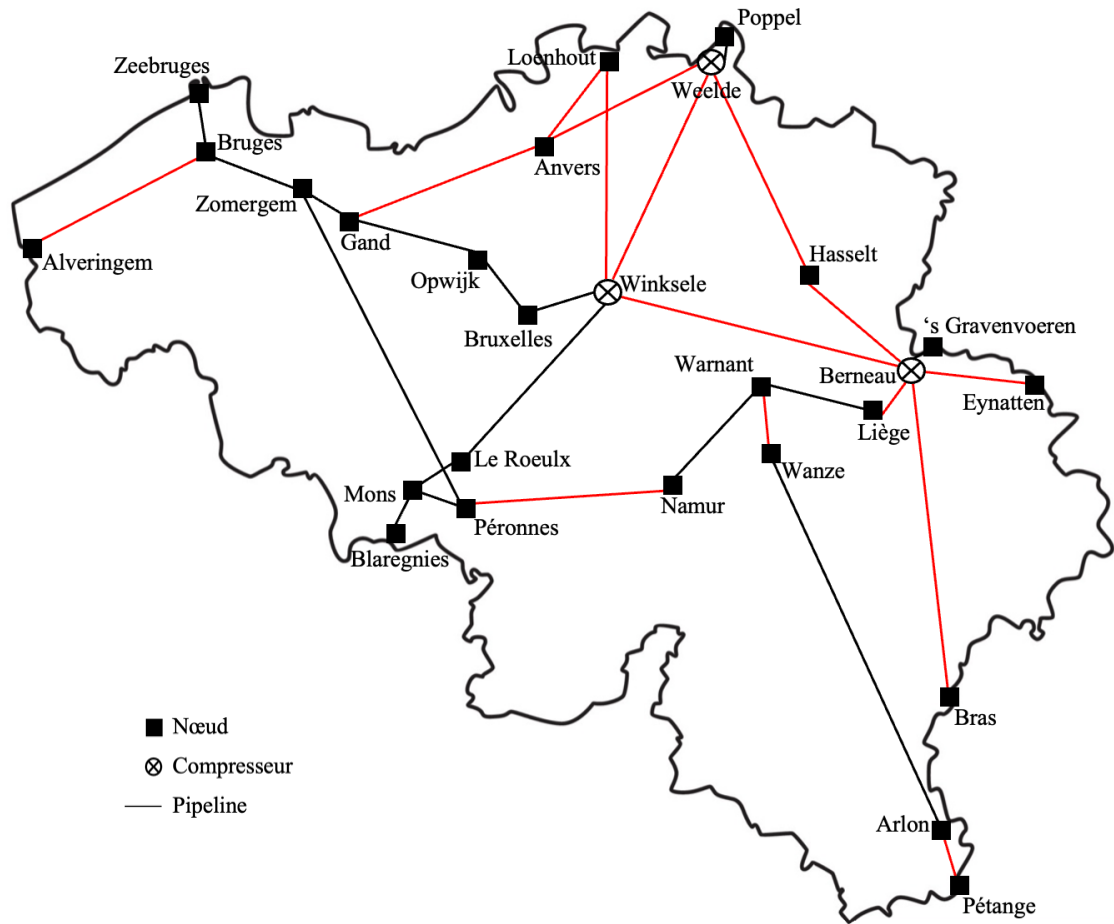


Figure 12 – Réseau avec arcs ayant besoin d'une valve en rouge

Essayons d'abord de comprendre ce que signifient les valeurs renvoyées par le modèle. Le logiciel GAMS met toutes les variables à gauche et donc transforme l'équation des gazoducs avec valves (3.3) en :

$$f_{ij}^2 - \text{sign}(f_{ij}) C_{ij}^2 (p_i^2 - p_j^2) \leq 0, \quad \forall (i, j) \in A_p$$

Ce qui explique bien pourquoi tous les chiffres sont nuls ou négatifs. S'ils sont nuls, cela signifie qu'il n'y a pas besoin de valve (on respecte la contrainte à l'égalité). Si le chiffre est strictement négatif, cela signifie que la différence de pression est supérieure à ce que l'équation de pertes de charge devrait donner. On réduit donc la pression à l'arrivée.

La première raison que nous relevons quant à l'utilisation des valves est celle pour laquelle nous avons introduit des valves dans le réseau, c'est-à-dire, pour diminuer la pression dans un gazoduc lorsque plusieurs gazoducs n'ayant pas les mêmes pressions se rejoignent à un même

nœud. C'est le cas pour les nœuds d'Anvers, de Brugge, d'Hasselt, de Péronnes, de Warnant, de Bras et pour les compresseurs de Winksele, de Weelde et de Berneau.

Ceci explique 14 des 15 lignes du tableau 13. Reste la ligne Arlon – Pétange où la pression à l'entrée du gazoduc à Arlon est de 30 *bar* (la limite inférieure à Arlon). S'il n'y avait pas de valve, on peut calculer par l'équation de perte de charge que la pression à Pétange serait de 29,98 *bar*. Le modèle utilise ici (sans conséquence pour l'objectif) une valve pour réduire cette pression à 27 *bar*, la pression minimum demandée à Pétange.

## Chapitre 5. Résilience du réseau – Scénarios

### 5.1. Explication de la nouvelle situation

Le troisième objectif de ce mémoire est de vérifier si le réseau belge de transport de gaz naturel est un réseau résilient. Cela signifie qu'il doit être capable de résister aux changements et de s'adapter rapidement aux perturbations.

Dans ce mémoire, nous allons analyser la résilience du réseau face à d'importants changements dans les quantités de gaz importées et exportées vers et depuis la Belgique. Pour ce faire, nous allons analyser les variations majeures des flux physiques nets de gaz naturel, par mois, entre la Belgique et chacun de ses pays voisins, ainsi que les flux de GNL. La Figure 13 illustre ces flux, où une valeur positive indique une importation nette vers le Belgique et une valeur négative indique une exportation nette depuis la Belgique. Ces flux sont exprimés en *TWh*. Un tableau détaillant les données exactes est disponible en Annexe 6. Par ailleurs, nous allons comparer ces quantités avec les demandes et offres utilisées dans notre modèle précédent.

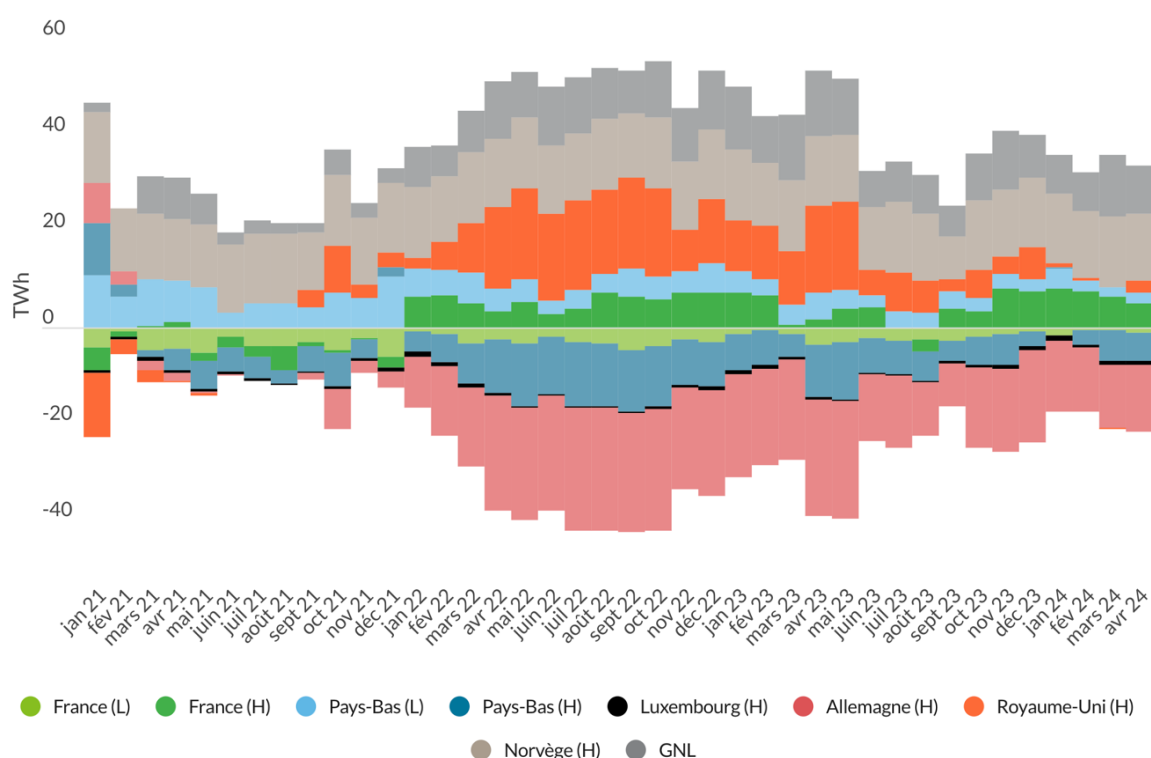


Figure 13 - Flux physiques nets de gaz naturel, par pays limitrophe, et de GNL (TWh) (SPF Économie, consulté le 15 juin 2024)

Dans la Figure 13 nous voyons quatre scénarios pertinents pour notre analyse de la résilience du réseau.

Dans le **premier scénario**, nous constatons que les Pays-Bas (en bleu foncé), autrefois exportateurs de gaz pauvre (L) vers la Belgique, deviennent importateurs de gaz riche (H). Cela s'explique par le fait que, comme mentionné au chapitre 2, les Pays-Bas ont décidé de cesser l'extraction de gaz pauvre en raison de l'épuisement des gisements et des problèmes sismiques. Par conséquent, ils doivent désormais importer du gaz pour répondre à leurs besoins internes. Par ailleurs, nous pensons que cette demande en gaz leur est fournie via Poppel, car nous faisons l'hypothèse que, lorsque les exportations de gaz pauvre cesseront, la Belgique pourra envoyer du gaz riche aux Pays-Bas par ce point d'interconnexion. De plus, en examinant la carte de la Figure 5, nous estimons que cette demande des Pays-Bas provient de Zeebruges et d'Alveringem. Pour répartir les quantités entre ces deux points, nous les estimons proportionnellement aux capacités d'entrée des différents points d'interconnexion, comme nous l'avions fait pour les données de notre modèle précédent (la méthodologie est disponible en Annexe 7). Cependant, nous obtenons un résultat indiquant que 1,59% de la demande des Pays-Bas parviendrait en Belgique via Alveringem. Ce pourcentage étant négligeable, nous estimons alors que toute la demande servant à fournir les Pays-Bas arrive sur le réseau belge via Zeebruges.

Le **deuxième scénario** est celui de l'exportation de gaz vers l'Allemagne (en rouge). En effet, comme le montre la Figure 13, depuis début 2022, l'Allemagne est le plus grand importateur de gaz provenant de Belgique, alors qu'auparavant elle en exportait vers la Belgique. Ce grand changement majeur est lié à l'invasion de l'Ukraine par la Russie en février 2022. En effet, selon l'Agence de l'UE pour la coopération des régulateurs de l'énergie (2023), 49% du gaz importé en Allemagne en 2021 provenait de Russie. Cependant, depuis l'invasion de l'Ukraine, les livraisons de gaz russe ont cessé. En conséquence, l'Allemagne importe désormais du gaz de Belgique. Ce gaz transite par le gazoduc souterrain qui relie Zeebruges à Eynatten, à la frontière allemande.

Ensuite, un **troisième scénario** qui nous semble pertinent est celui de l'import de gaz français. Depuis début 2022, la Belgique importe du gaz riche en provenance de la France (en vert foncé), alors qu'auparavant la situation était inversée. Selon Fluxys (2021b), le gaz importé depuis la France, vient du terminal de Dunkerque. Nous émettons donc l'hypothèse que cette

exportation nette vers la Belgique s'explique par le fait que, lorsqu'il n'y a pas assez de capacité de déchargement au terminal GNL de Zeebruges, une quantité de gaz est acheminée depuis le terminal GNL de Dunkerque vers le point d'interconnexion d'Alveringem, à la frontière française. De là, le gaz remonte vers Zeebruges où il peut alors être consommé en interne ou exporté vers les Pays-Bas, l'Allemagne ou le Luxembourg. A noter que les volumes transportés depuis la France ont tendance à être plus élevés depuis le début de la guerre en Ukraine.

Enfin, la Figure 13 montre que la demande de la France (en vert clair) est très faible, voire nulle pour certains mois, alors qu'elle était l'une des demandes les plus importantes dans notre modèle précédent. De plus, dans ce modèle, la demande française entrainait dans le réseau belge via les points d'interconnexion de Zeebruges, Poppel et 's Gravenvoeren, et le gaz était renvoyé vers la France par Blaregnies. Cependant, comme l'explique le premier scénario ci-dessus, les Pays-Bas sont devenus des demandeurs. Il n'y a donc pas de raison d'envoyer du gaz aux Pays-Bas pour qu'ils le réexportent vers le réseau belge à destination de la France. Par conséquent, dans ce **quatrième scénario**, le gaz destiné à répondre à la demande française entrera dans le réseau belge uniquement par Zeebruges.

## 5.2. Nouvelles quantités $s_i$

Maintenant que les scénarios sont posés, il faut estimer les nouvelles quantités exportées ou importées. Les flux de la Figure 13 sont donnés en  $TWh$ , tandis que notre modèle utilise des  $m^3/jour$ , nécessitant une conversion. Pour ce faire, nous devons choisir un pays de référence. Nous avons décidé d'utiliser les données du Luxembourg. En effet, les quantités exportées vers le Luxembourg varient peu, et nous connaissons la demande en  $m^3/jour$  de ce pays. Nous avons donc procédé ainsi :

1. Calcul de la moyenne des flux des six derniers mois pour chaque pays ;
2. Calcul des rapports entre ces moyennes et la moyenne de flux pour le Luxembourg ;
3. Multiplication de ces ratios par la demande luxembourgeoise en  $m^3/jour$ .

Cette méthode nous a permis de déterminer les quantités importées ou exportées pour les différents pays dans nos scénarios. Ces données sont présentées dans le tableau 14, tandis que les calculs détaillés sont disponibles en Annexe 6.

| Pays      | Demande<br>[ $10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ ] | Offre<br>[ $10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ ] |
|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Pays-Bas  | 3,520                                         | /                                           |
| Allemagne | 13,420                                        | /                                           |
| France    | 0,717                                         | 6,248                                       |

Tableau 14 – Quantités importées ou exportées dans nos scénarios

A l'exception des données de  $s_i$ , toutes les autres données utilisées sont identiques à celles présentées dans la section 4.1. Le tableau 15 résume les données relatives aux nœuds du réseau en tenant compte des différents scénarios.

| Nœud | Ville           | $s_i$<br>[ $10^6 \text{ m}^3$ ] | $\underline{p}_i$<br>[bar] | $\overline{p}_i$<br>[bar] |
|------|-----------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1    | Zeebruges       | 66,793                          | 55                         | 80                        |
| 2    | Bruges          | -13,660                         | 30                         | 80                        |
| 3    | Zomergem        | 0,000                           | 0                          | 80                        |
| 4    | Loenhout        | 14,971                          | 60                         | 80                        |
| 5    | Anvers          | -22,818                         | 30                         | 80                        |
| 6    | Gand            | -13,139                         | 30                         | 80                        |
| 7    | 's Gravenvoeren | 12,209                          | 49                         | 66,2                      |
| 8    | Berneau-IN      | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 9    | Berneau-OUT     | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 10   | Liège           | -7,488                          | 30                         | 66,2                      |
| 11   | Warnant         | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 12   | Namur           | -3,274                          | 30                         | 66,2                      |
| 13   | Péronnes        | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 14   | Mons            | -12,770                         | 30                         | 66,2                      |
| 15   | Blaregnies      | -0,719                          | 49                         | 66,2                      |
| 16   | Wanze           | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 17   | Arlon           | -0,788                          | 30                         | 66,2                      |
| 18   | Pétange         | -0,180                          | 27                         | 66,2                      |
| 19   | Poppel          | 12,284                          | 49                         | 66,2                      |
| 20   | Weelde-IN       | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 21   | Weelde-OUT      | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 22   | Winksele-IN     | 0,000                           | 0                          | 80                        |
| 23   | Winksele-OUT    | 0,000                           | 0                          | 80                        |
| 24   | Le Rœulx        | 0,000                           | 0                          | 66,2                      |
| 25   | Bruxelles       | -20,084                         | 30                         | 66,2                      |
| 26   | Eynatten        | -10,887                         | 55                         | 80                        |
| 27   | Opwijk          | 0,000                           | 0                          | 80                        |
| 28   | Alveringem      | 6,248                           | 55                         | 84,5                      |
| 29   | Hasselt         | -6,218                          | 30                         | 66,2                      |
| 30   | Bras            | -0,480                          | 27                         | 66,2                      |

Tableau 15 - Description des nœuds du réseau avec les scénarios

### 5.3. Analyse des résultats

Les quatre scénarios ont été implémentés dans un même modèle dans GAMS, qui renvoie immédiatement à une solution optimale. Nous obtenons la même valeur de l'objectif que pour le modèle précédent : le réseau n'a **pas besoin de compresseurs** pour acheminer le gaz aux différentes villes et points d'interconnexion du réseau. En effet, la valeur optimale trouvée pour la puissance des compresseurs est de 0,000 *kW*.

Les résultats de ce second modèle démontrent clairement la résilience du réseau de transport de gaz belge. Effectivement, le modèle montre qu'en utilisant les infrastructures déjà présentes sur le réseau, sans avoir besoin de recourir à de nouveaux investissements (gazoducs ou compresseurs), la Belgique peut devenir exportatrice de gaz vers les Pays-Bas (scénario 1), peut également devenir un important fournisseur pour l'Allemagne (scénario 2), et peut s'adapter au fait que la France devienne exportatrice et non plus importatrice (scénarios 3 et 4). De plus, comme montré dans le premier modèle, le réseau de transport belge a su bénéficier de l'intégration complète du réseau L dans le réseau H.

Par ailleurs, ces changements reflètent bien une modification des flux circulant en Belgique, comme mentionné dans le chapitre 2 de ce mémoire. Les flux sont passés d'une orientation nord-sud, de l'Allemagne et des Pays-Bas vers la France, à une orientation ouest-est, de la France et de la Norvège vers l'Allemagne et les Pays-Bas.

En conclusion, la Belgique dispose d'un réseau de transport de gaz très résilient. En effet, pour des changements aussi significatifs dans les importations et les exportations, l'exploitation de notre modèle montre que le réseau de transport de gaz belge peut fournir les nouvelles quantités demandées sans avoir besoin d'être renforcé.

## Chapitre 6. Conclusions

Pour rappel, ce mémoire a pour objectifs principaux de mettre à jour le modèle proposé par De Wolf et Smeers (2000) et de le faire tourner avec une actualisation du réseau de transport de gaz belge. En outre, nous voulions démontrer que ce réseau est particulièrement résilient aux changements dans l'offre et la demande.

En conclusion, l'analyse approfondie du réseau de transport de gaz naturel belge démontre sa remarquable résilience et flexibilité face aux changements significatifs des dynamiques d'importation et d'exportation. Les résultats obtenus à partir des différents scénarios étudiés confirment que le réseau belge peut répondre aux nouvelles demandes de transport sans la nécessité de renforcements majeurs, comme la construction de nouveaux compresseurs ou de gazoducs.

Les scénarios analysés illustrent que la Belgique, grâce à ses infrastructures existantes, peut non seulement continuer à répondre à ses besoins internes, mais aussi jouer un rôle crucial comme exportateur vers les Pays-Bas et fournisseur important pour l'Allemagne. Cette capacité d'adaptation est essentielle dans un contexte énergétique en constante évolution, où la dépendance aux flux traditionnels nord-sud a évolué vers une dynamique ouest-est.

Ce mémoire montre également que la Belgique est en mesure de s'adapter aux changements dans la gestion des flux, notamment avec l'intégration du gaz pauvre (L) dans le réseau de gaz riche (H), sans perturber l'efficacité du réseau. De plus, il peut s'adapter aux changements dus à l'arrêt des exportations de gaz russe. Cette flexibilité est cruciale pour maintenir la sécurité énergétique du pays et optimiser l'utilisation des ressources existantes.

En outre, nous avons eu l'opportunité de pouvoir collaborer avec Monsieur Nico Vanderpijpen, ingénieur du service Infrastructures, Capacity and Planning chez Fluxys, qui nous a rectifié et complété nos données du réseau. Nous avons donc également testé nos modèles sur ces données rectifiées et complétées et les conclusions sont les mêmes : le réseau

se passe des compresseurs<sup>8</sup>. Ceci démontre que malgré les nombreuses hypothèses de départ, nos conclusions restent correctes.

En résumé, le réseau de transport de gaz naturel belge, tel qu'évalué dans ce mémoire, s'avère robuste et capable de s'adapter aux futurs défis énergétiques, assurant ainsi une distribution fiable et efficace du gaz naturel tant au niveau national qu'international. Ces conclusions mettent en lumière l'importance de la planification stratégique et de l'optimisation des infrastructures pour garantir la durabilité et la résilience du réseau de transport de gaz belge.

Par ailleurs, bien que ce mémoire apporte des résultats significatifs, certaines limites doivent être prises en considération.

Premièrement, les modèles et les analyses présentés se basent principalement sur des hypothèses. Ceci implique que toute modification substantielle des paramètres ou des conditions du marché pourraient influencer les résultats. De plus, les modèles utilisés simplifient certains aspects complexes du réseau de transport de gaz. Par exemple, les impacts des variations saisonnières de la demande ou des compresseurs mis en parallèles dans une même station de compression ne sont pas entièrement explorés.

En outre, dans ce mémoire, nous n'avons pas pris en compte les technologies émergentes qui pourraient affecter l'efficacité et la résilience du réseau dans le futur, ainsi que l'intérêt croissant des pays pour des alternatives moins polluantes au gaz, comme l'hydrogène. En effet, Fluxys veut, par exemple, proposer d'ici 2026 la première infrastructure de transport d'hydrogène (Fluxys, consulté le 29 juillet 2024), où une seule canalisation pourra être utilisée si bien pour le gaz que pour l'hydrogène (Fluxys, consulté le 30 juillet 2024). Ceci modifiera complètement les données actualisées proposées dans ce mémoire.

Enfin, le contexte géopolitique, notamment les relations entre les pays exportateurs et importateurs de gaz, peut rapidement changer, influençant ainsi la disponibilité et les flux de gaz naturel. Ces aspects sont partiellement intégrés dans les scénarios étudiés mais restent une source d'incertitude.

---

<sup>8</sup> Ce réseau corrigé et complété contient des données confidentielles que nous n'avons pas pu partager. Pour tout renseignement sur ces données, veuillez contacter le Professeur Daniel De Wolf à l'adresse suivante : [12](#)

Ces limites doivent être prise en compte lors de l'interprétation des résultats de ce mémoire. Elles ouvrent également des pistes pour des recherches futures afin de continuer à améliorer la résilience et l'efficacité du réseau de transport de gaz en Belgique.

## Bibliographie

- Agency for the Cooperation of Energy Regulators. (2023). *Part de l'approvisionnement en gaz russe en Europe en 2021, par pays* [Graphique]. Dans Statista. Consulté le 26 juillet 2024, à l'adresse <https://fr-statista-com.hub.tbs-education.fr/statistiques/1290855/dependance-gaz-russe-europe-pays/>
- Bakhouya, B., & De Wolf, D. (2008). Solving gas transmission problems by taking compressors into account. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/228464201\\_Solving\\_gas\\_transmission\\_problems\\_by\\_taking\\_compressors\\_into\\_account](https://www.researchgate.net/publication/228464201_Solving_gas_transmission_problems_by_taking_compressors_into_account)
- Belga. (2022, 14 décembre). Crise énergétique : le pic annuel de consommation de gaz presque égalé mardi. *RTBF*. <https://www.rtbf.be/article/crise-energetique-le-pic-annuel-de-consommation-de-gaz-presque-egale-mardi-11123246>
- CREG - Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz. (2008). *Surveillance de la capacité d'importation de gaz naturel 2008*. <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Publications/Studies/F765FR.pdf>
- CREG - Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz. (2022). *Rapport annuel 2022*. <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Publications/AnnualReports/CREG-AR2022-FR.pdf>
- De Wolf, D., & Smeers, Y. (2000). The Gas Transmission Problem Solved by an Extension of the Simplex Algorithm. *Management Science*, 46(11), 1454-1465. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.11.1454.12087>
- Daniel De Wolf (2017). Mathematical Properties of Formulations of the Gas Transmission Problem. *Technical Journal*, 11(3), 133-137.
- Denys. (s. d.). *Fluxys*. Consulté le 26 avril 2024, à l'adresse <https://www.denys.com/projecten/fluxys-gent-zeehaven>

Dremiere, A. (2015, 22 mai). De Dunkerque à Zeebruges en pipeline : un chantier pharaonique. *RTBF*. <https://www.rtbf.be/article/de-dunkerque-a-zeebruge-en-pipeline-8987614?id=8987614>

Entsog. (2024). *System capacity map*. <https://www.entsog.eu/maps#system-capacity-map-2024>

FEBEG. (s. d.). *Secteur du gaz*. Consulté le 15 mars 2024, à l'adresse <https://www.febeg.be/fr/secteur-du-gaz>

FEBEG. (2022). *Rapport Annuel 2022*. [https://www.febeg.be/sites/default/files/febeg\\_annual\\_report\\_detailed\\_slide\\_deck\\_2022\\_fr.pdf](https://www.febeg.be/sites/default/files/febeg_annual_report_detailed_slide_deck_2022_fr.pdf)

FIGAZ, Carte du réseau de transport de gaz naturel en Belgique éditée par la Fédération de l'Industrie du Gaz, Bruxelles, Janvier 1988.

Fluvius. (2022). *Verbruiksgegevens per straat* [Base de données]. [https://opendata.fluvius.be/explore/dataset/1\\_03-verbruiksgegevens-op-straatniveau/information/?refine.energie=Gas&refine.verbruiksjaar=2022&refine.richting=Injectie](https://opendata.fluvius.be/explore/dataset/1_03-verbruiksgegevens-op-straatniveau/information/?refine.energie=Gas&refine.verbruiksjaar=2022&refine.richting=Injectie)

Fluxys. (s. d.-a). *Dunkerque LNG Infrastructure*. Consulté le 23 juillet 2024, à l'adresse <https://www.fluxys.com/fr/about-us/dunkerque-lng/infrastructure>

Fluxys. (s. d.-b). *Fluxys en Belgique*. Consulté le 15 mars 2024, à l'adresse <https://www.fluxys.com/fr/natural-gas-and-biomethane/supplying-europe/belgium>

Fluxys. (s. d.-c). *L'autoroute de l'hydrogène Zeebruges - Bruxelles*. Consulté le 30 juillet 2024, à l'adresse <https://www.fluxys.com/fr/projects/h2highwayzbbxl>

Fluxys. (s. d.-d). *L'hydrogène, l'élément polyvalent pour une économie neutre en carbone*. Consulté le 29 juillet 2024, à l'adresse <https://www.fluxys.com/fr/hydrogen#/>

Fluxys. (s. d.-e). *Nos infrastructures*. Consulté le 26 avril 2024, à l'adresse <https://www.fluxys.com/fr/about-us/fluxys-belgium/infrastructure>

Fluxys. (2021a). *Plan indicatif d'investissements Fluxys Belgium & Fluxys LNG 2021-2030*.

[https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/corporate/tyndp/2021/tyndp\\_flx\\_be\\_lng\\_2021\\_2030\\_fr\\_external.pdf](https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/corporate/tyndp/2021/tyndp_flx_be_lng_2021_2030_fr_external.pdf)

Fluxys. (2021b). *Plan indicatif d'investissements Fluxys Belgium & Fluxys LNG 2021-2030*.

[https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/corporate/tyndp/2021/tyndp\\_flx\\_be\\_lng\\_2021\\_2030\\_fr\\_external.pdf](https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/corporate/tyndp/2021/tyndp_flx_be_lng_2021_2030_fr_external.pdf)

Fluxys. (2021c). *Programme de Transport*. [https://www.fluxys.com/-](https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/commercial/terms_conditions-and-contracts/transmission/20210908/tp---fr---approved-aug-2021.pdf)

[/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/commercial/terms\\_conditions-and-contracts/transmission/20210908/tp---fr---approved-aug-2021.pdf](https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/documents/fluxys-belgium/commercial/terms_conditions-and-contracts/transmission/20210908/tp---fr---approved-aug-2021.pdf)

Global Energy Monitor. (s. d.). Dunkirk-Zeebrugge Gas Pipeline - Global Energy Monitor.

Dans *Global Energy Monitor*. Consulté le 26 avril 2024, à l'adresse [https://www.gem.wiki/Dunkirk-Zeebrugge\\_Gas\\_Pipeline](https://www.gem.wiki/Dunkirk-Zeebrugge_Gas_Pipeline)

Gouvernement wallon. (2017). *Arrêté du Gouvernement wallon du 15 mars 2017*.

[https://wallex.wallonie.be/files/pdfs/13/3127\\_Arr%C3%aat%C3%A9\\_du\\_Gouvernement\\_wallon\\_d%C3%A9cidant\\_la\\_mise\\_en\\_r%C3%A9vision\\_des\\_plans\\_de\\_secteur\\_de\\_Verviers-Eupen%2c\\_Li%C3%A8ge\\_et\\_Huy-Waremme\\_et\\_adoptant\\_l'avant-projet\\_de\\_r%C3%A9vision\\_des\\_plans\\_de\\_secteur\\_de\\_Verviers-Eup\\_06-05-2007-.pdf](https://wallex.wallonie.be/files/pdfs/13/3127_Arr%C3%aat%C3%A9_du_Gouvernement_wallon_d%C3%A9cidant_la_mise_en_r%C3%A9vision_des_plans_de_secteur_de_Verviers-Eupen%2c_Li%C3%A8ge_et_Huy-Waremme_et_adoptant_l'avant-projet_de_r%C3%A9vision_des_plans_de_secteur_de_Verviers-Eup_06-05-2007-.pdf)

Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse. (2024). *Gaz transporté par commune* [Base de données].

<https://ibsa.brussels/themes/environnement-et-energie/energie#nergieaconsommeaparasecteur>

IWEPS - Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique. (2024). *Énergie : consommation, production et Plan d'Action pour l'Efficacité Énergétique (PAEE)* [Base de données].

[https://walstat.iweps.be/walstat-catalogue.php?indicateur\\_id=811400&ordre=0](https://walstat.iweps.be/walstat-catalogue.php?indicateur_id=811400&ordre=0)

Parlement européen. (2024, avril). *Marché intérieur de l'énergie*.

<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/45/marche-interieur-de-l-energie>

SPF Économie. (s. d.). *Suivi des objectifs européens concernant la consommation et le stockage de gaz naturel*. Consulté le 15 juin 2024, à l'adresse <https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/suivi-des-objectifs-europeens/suivi-des-objectifs-europeens>

SPF Économie. (2021a). *Étude prospective concernant la sécurité d'approvisionnement en gaz naturel à l'horizon 2030-2035*. <https://economie.fgov.be/sites/default/files/Files/Publications/files/Etude-prospective-concernant-la-securite-d-approvisionnement-en-gaz-naturel-a-l-horizon-2030-2035.pdf>

SPF Économie. (2021b). *Commerce international du gaz en Belgique*. <https://economie.fgov.be/fr/file/337517/download?token=pjvdndOq>

SPF Économie. (2023). *Belgian Energy Data Overview - été 2023*. <https://economie.fgov.be/fr/file/7466628/download?token=rIJYUGpr>

SPF Économie. (2024). *Belgian Energy Data Overview - janvier 2024*. <https://economie.fgov.be/fr/publications/belgian-energy-data-overview-0>

TV Lux. (2013, 31 mai). *Province : construction du gazoduc par Fluxys* [Vidéo]. [https://www.tvlux.be/video/info/societe/province-construction-du-gazoduc-par-fluxys\\_13611.html](https://www.tvlux.be/video/info/societe/province-construction-du-gazoduc-par-fluxys_13611.html)

Vlaanderen. (s. d.). *Geopunt*. Consulté le 30 avril 2024, à l'adresse <https://www.geopunt.be/>

## Annexe 1 – Entreprises actives en 2022 sur le marché belge sur le plan du shipping de gaz naturel

| VOLUME ACHÉMINÉ EN BELGIQUE (en TWh)*                           | 2021         |            | 2022         |            | Δ2022/2021 |              |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|
| PARTS DE MARCHÉ EN BELGIQUE (en %)                              | TWh          | %          | TWh          | %          | (%)**      | (%-point)*** |
| Antargaz SAS                                                    | 2,82         | 1,48       | 1,32         | 0,82       | -53        | -0,7         |
| ArcelorMittal Energy SCA                                        | 5,02         | 2,64       | 3,76         | 2,33       | -25        | -0,3         |
| Axpo Solutions AG                                               | 1,07         | 0,56       | 0,58         | 0,36       | -46        | -0,2         |
| BASF Antwerpen NV                                               |              |            | 0,81         | 0,50       |            |              |
| Belgian Eco Energy NV                                           | 0,15         | 0,08       | 0,09         | 0,06       | -38        | 0,0          |
| Eneco Energy Trade BV                                           | 9,89         | 5,20       | 7,72         | 4,79       | -22        | -0,4         |
| Energy Global Handel BV                                         | 1,13         | 0,59       | 0,88         | 0,55       | -22        | 0,0          |
| Engie SA - Electrabel SA/NV                                     | 75,27        | 39,56      | 66,50        | 41,23      | -12        | 1,7          |
| Eni SpA                                                         | 17,07        | 8,97       | 16,79        | 10,41      | -2         | 1,4          |
| Enovos Luxembourg SA                                            | 0,44         | 0,23       |              |            |            |              |
| Equinor ASA                                                     | 4,77         | 2,51       | 5,36         | 3,32       | 12         | 0,8          |
| Essent Sales Portfolio Management BV                            | 2,32         | 1,22       |              |            |            |              |
| European Energy Pooling BVBA                                    | 5,71         | 3,00       | 3,09         | 1,92       | -46        | -1,1         |
| GETEC Energie GmbH                                              | 0,27         | 0,14       | 0,27         | 0,17       | 0          | 0,0          |
| Lampiris SA                                                     | 0            | 0,00       |              |            |            |              |
| Luminus NV                                                      | 21,15        | 11,12      | 20,60        | 12,77      | -3         | 1,7          |
| Novatek Gas & Power GmbH                                        | 0,33         | 0,17       |              |            |            |              |
| OMV Gas Marketing & Trading GmbH                                | 3,62         | 1,90       | 4,28         | 2,65       | 18         | 0,8          |
| Power Online SA                                                 | 1,4          | 0,74       | 2,21         | 1,37       | 58         | 0,6          |
| Progress Energy Services                                        | 0,93         | 0,49       |              |            |            |              |
| RWE Supply & Trading GmbH - UK Desk                             | 2,27         | 1,19       |              |            |            |              |
| Scholt Energy Control NV                                        | 0,07         | 0,04       | 0,14         | 0,09       | 100        | 0,1          |
| Soc. Europ. de Gestion de l'Energie SA                          | 1,2          | 0,63       | 2,38         | 1,48       | 98         | 0,8          |
| TotalEnergies Electricité et Gaz France SA                      | 1,69         | 0,89       | 1,10         | 0,68       | -35        | -0,2         |
| TotalEnergies Gas & Power Ltd                                   | 17,46        | 9,18       |              |            |            |              |
| TotalEnergies Gas & Power Limited, London, Meyrin-Geneva Branch |              |            | 13,08        | 8,11       |            |              |
| TotalEnergies Power & Gas Belgium SA                            |              |            | 0,03         | 0,02       |            |              |
| Uniper Global Commodities SE                                    | 0,49         | 0,26       | 0,46         | 0,28       | -6         | 0,0          |
| Wingas GmbH                                                     | 13,73        | 7,22       | 9,83         | 6,10       | -28        | -1,1         |
| <b>TOTAL FINAL</b>                                              | <b>190,3</b> | <b>100</b> | <b>161,3</b> | <b>100</b> | <b>-15</b> |              |

\* Ces chiffres concernent les fournitures aux clients raccordés au réseau de transport et aux points de prélèvement des réseaux de distribution. Pour des statistiques distinctes sur la fourniture aux clients raccordés aux réseaux de transport et de distribution, le lecteur est invité à consulter le rapport commun des quatre régulateurs énergétiques sur l'évolution des marchés de l'électricité et du gaz naturel en Belgique, sur le site Internet de la CREG ([www.creg.be](http://www.creg.be)).

\*\* Évolution relative 2022 par rapport à 2021 (la base est 2021).

\*\*\* Évolution absolue de la part de marché.

Figure 14 – Source : CREG - Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (2022)

## Annexe 2 – Coefficient $C_{ij}$

Pour la contrainte (3.3), nous avons utilisé le coefficient  $C_{ij}$  qui est une constante qui est fonction de la longueur, du diamètre et de la rugosité de la conduite ainsi que du type de gaz transporté. Cette constante se calcule selon cette formule (De Wolf et Smeers, 2000) :

$$C_{ij}^2 = 96,074830 \times 10^{-15} \frac{D^5}{\lambda z T L \delta} \quad (3.10)$$

où

$$\frac{1}{\lambda} = \left[ 2 \log \left( \frac{3,7D}{\epsilon} \right) \right]^2 \quad (3.11)$$

avec :

$L$  = longueur du gazoduc [km]

$D$  = diamètre intérieur du gazoduc [mm]

$T$  = température d gaz [K] = 281,15 K

$\epsilon$  = rugosité absolue du gazoduc [mm] = 0,05 mm

$\delta$  = densité du gaz relative à l'air = 0,6106

$z$  = facteur de compressibilité du gaz = 0,8

### Annexe 3 – Comment traiter deux arcs parallèles

Dans les réseaux de gaz, il arrive fréquemment que lorsque la capacité nécessaire dépasse le diamètre maximum constructible, deux ou trois canalisations soient installées en parallèle. Cela signifie que certains nœuds sont reliés par des gazoducs parallèles. Il existe une méthode pour prendre cela en compte et transformer deux ou trois arcs parallèles en un arc équivalent unique. Bakhouya & De Wolf (2008) proposent cette méthode pour deux arcs parallèles.

Premièrement, supposons que nous ayons deux arcs parallèles avec les mêmes points de départ  $i$  et d'arrivée  $j$ . Le flux dans le premier arc est noté  $f_{ij}^a$  et le flux dans le second arc est noté  $f_{ij}^b$ . Nous avons donc les équations suivantes :

$$\begin{aligned}(f_{ij}^a)^2 &= (C_{ij}^a)^2 (p_i^2 - p_j^2) \\ (f_{ij}^b)^2 &= (C_{ij}^b)^2 (p_i^2 - p_j^2)\end{aligned}\tag{3.12}$$

On peut remarquer que  $p_i$  et  $p_j$  sont identiques, puisqu'il s'agit des mêmes nœuds de départ et d'arrivée. Nous pouvons alors finir un arc équivalent au flux total, qui est évidemment :

$$f_{ij} = f_{ij}^a + f_{ij}^b\tag{3.13}$$

Calculons maintenant  $f_{ij}^2$  :

$$\begin{aligned}f_{ij}^2 &= (f_{ij}^a + f_{ij}^b)^2 = (f_{ij}^a)^2 + (f_{ij}^b)^2 + 2(f_{ij}^a)(f_{ij}^b) \\ &= (C_{ij}^a)^2 (p_i^2 - p_j^2) + (C_{ij}^b)^2 (p_i^2 - p_j^2) + 2(C_{ij}^a) \sqrt{p_i^2 - p_j^2} (C_{ij}^b) \sqrt{p_i^2 - p_j^2} \\ &= \left[ (C_{ij}^a)^2 + (C_{ij}^b)^2 + 2(C_{ij}^a)(C_{ij}^b) \right] (p_i^2 - p_j^2) \\ &= (C_{ij}^a + C_{ij}^b)^2 (p_i^2 - p_j^2)\end{aligned}$$

Nous obtenons donc un arc unique équivalent en mettant :

$$f_{ij}^2 = (C_{ij}^a + C_{ij}^b)^2 (p_i^2 - p_j^2)\tag{3.14}$$

Nous pouvons également appliquer la méthode de Bakhouya et De Wolf, au cas de trois arcs parallèles. Supposons donc qu'il y ait maintenant trois arcs parallèles avec les mêmes points de départ  $i$  et d'arrivée  $j$ , et que le flux dans ce troisième arc soit noté  $f_{ij}^c$ .

On peut appliquer directement (3.14), en faisant l'addition du flux  $f_{ij}$ , somme de  $f_{ij}^a$  et de  $f_{ij}^b$ , d'une part et du flux  $f_{ij}^c$  d'autre part :

$$\begin{aligned} f_{ij}^2 &= (C_{ij}^a + C_{ij}^b)^2 (p_i^2 - p_j^2) \\ (f_{ij}^c)^2 &= (C_{ij}^c)^2 (p_i^2 - p_j^2) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$p_i$  et  $p_j$  sont toujours identiques, nous pouvons donc définir un arc équivalent que nous noterons  $f_{ij}^d$  et qui se calcule par :

$$f_{ij}^d = f_{ij} + f_{ij}^c \quad (3.16)$$

Les calculs sont similaires à ce qui est fait ci-dessus et on obtient :

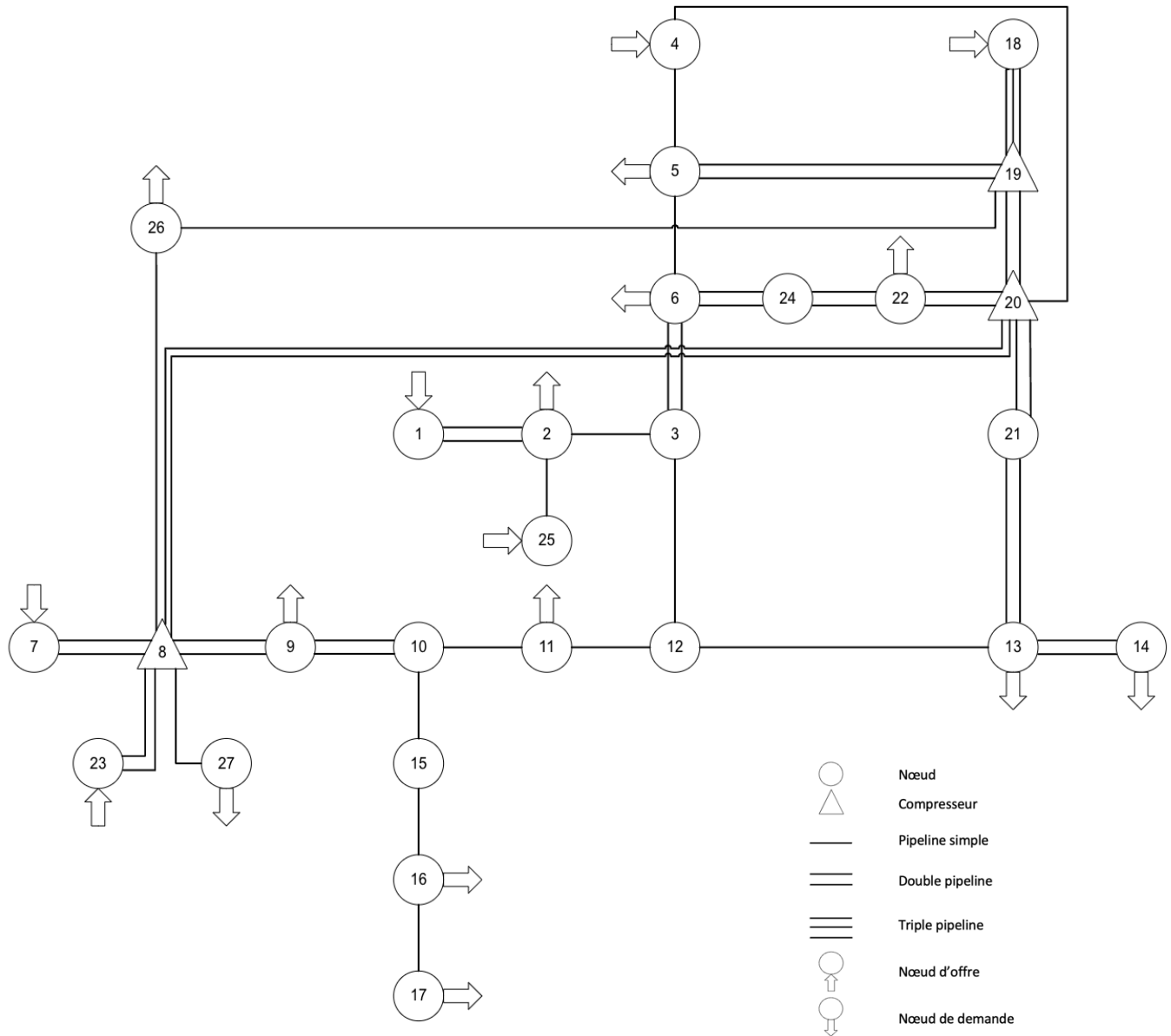
$$(f_{ij}^d)^2 = (C_{ij}^a + C_{ij}^b + C_{ij}^c)^2 (p_i^2 - p_j^2) \quad (3.17)$$

## Annexe 4 – Hypothèses et sources des arcs du réseau

| Arc | De              | À          | Source                                                                             |
|-----|-----------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Zeebruges       | Bruges     | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 2   | Zeebruges       | Bruges     | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 3   | Bruges          | Zomergem   | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 4   | Loenhout        | Anvers     | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 5   | Anvers          | Gand       | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 6   | Gand            | Zomergem   | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 7   | Gand            | Zomergem   | Rapport de la CREG, 2008 (distance)<br>Denys, consulté le 26 avril 2024 (diamètre) |
| 8   | Zomergem        | Péronnes   | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 9   | 's Gravenvoeren | Berneau    | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 10  | 's Gravenvoeren | Berneau    | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 11  | Berneau         | Liège      | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 12  | Berneau         | Liège      | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 13  | Liège           | Warnant    | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 14  | Liège           | Warnant    | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 15  | Warnant         | Namur      | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 16  | Namur           | Péronnes   | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 17  | Péronnes        | Mons       | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 18  | Mons            | Blaregnies | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 19  | Mons            | Blaregnies | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 20  | Warnant         | Wanze      | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 21  | Wanze           | Arlon      | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 22  | Arlon           | Pétange    | De Wolf et Smeers, 2000                                                            |
| 23  | Poppel          | Weelde     | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 24  | Poppel          | Weelde     | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 25  | Poppel          | Weelde     | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 26  | Weelde          | Winksele   | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 27  | Weelde          | Winksele   | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 28  | Winksele        | Le Rœulx   | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 29  | Winksele        | Le Rœulx   | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |

|    |            |           |                                                                                    |
|----|------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 30 | Le Rœulx   | Mons      | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 31 | Le Rœulx   | Mons      | FIGAZ, 1988 (diamètre),<br>Google Maps (distance)                                  |
| 32 | Weelde     | Anvers    | Google Maps (distance)                                                             |
| 33 | Weelde     | Anvers    | Google Maps (distance)                                                             |
| 34 | Weelde     | Hasselt   | Google Maps (distance)                                                             |
| 35 | Hasselt    | Berneau   | Google Maps (distance)                                                             |
| 36 | Eynatten   | Berneau   | Arrêté du 15 mars 2007 de la Région<br>Wallonne                                    |
| 37 | Eynatten   | Berneau   | Arrêté du 15 mars 2007 de la Région<br>Wallonne                                    |
| 38 | Berneau    | Winksele  | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |
| 39 | Berneau    | Winksele  | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |
| 40 | Winksele   | Bruxelles | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |
| 41 | Winksele   | Bruxelles | Denys, consulté le 26 avril 2024                                                   |
| 42 | Bruxelles  | Opwijk    | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |
| 43 | Bruxelles  | Opwijk    | Denys, consulté le 26 avril 2024                                                   |
| 44 | Opwijk     | Gand      | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |
| 45 | Opwijk     | Gand      | Rapport de la CREG, 2008 (distance)<br>Denys, consulté le 26 avril 2024 (diamètre) |
| 46 | Berneau    | Bras      | Tvlux, 2013 (diamètre),<br>Google Maps (longueur)                                  |
| 47 | Alveringem | Bruges    | RTBF, 2015 (distance),<br>gem.wiki, consulté le 26 avril 2024<br>(diamètre)        |
| 48 | Winksele   | Loenhout  | Rapport de la CREG, 2008<br>(distance et diamètre)                                 |

Tableau 16 - Hypothèses et sources pour les arcs du réseau



|             |                   |               |              |               |
|-------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 Zeebruges | 7 's Gravenvoeren | 13 Mons       | 19 Weelde    | 25 Alveringem |
| 2 Bruges    | 8 Berneau         | 14 Blaregnies | 20 Winksele  | 26 Hasselt    |
| 3 Zomergem  | 9 Liège           | 15 Wanze      | 21 Le Rœulx  | 27 Bras       |
| 4 Loenhout  | 10 Warnant        | 16 Arlon      | 22 Bruxelles |               |
| 5 Anvers    | 11 Namur          | 17 Pétange    | 23 Eynatten  |               |
| 6 Gand      | 12 Péronnes       | 18 Poppel     | 24 Opwijk    |               |

Figure 15 - Diagramme du réseau belge de transport de gaz à haute pression

## Annexe 5 – Hypothèses et sources des nœuds du réseau

| Nœud | Ville           | Référence pression        | Référence volume                                                                          |
|------|-----------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Zeebruges       | Management Science, 2000  | 55% de l'offre de la Norvège + Offre du Qatar + Offre UK + 55% de Blaregnies (demande FR) |
| 2    | Bruges          | Management Science, 2000  | Demande de la province de Flandre occidentale                                             |
| 3    | Zomergem        | Management Science, 2000  |                                                                                           |
| 4    | Loenhout        | Management Science, 2000  | Capacité de déstockage de Loenhout                                                        |
| 5    | Anvers          | Management Science, 2000  | Demande de la province d'Anvers                                                           |
| 6    | Gand            | Management Science, 2000  | Demande de la province de Flandre orientale                                               |
| 7    | 's Gravenvoeren | Management Science, 2000  | 19% de l'offre de la Norvège + Pétange + Bras + 19 % de Blaregnies (demande FR)           |
| 8    | Berneau         | Management Science, 2000  |                                                                                           |
| 9    | Liège           | Management Science, 2000  | Demande de la province de Liège                                                           |
| 10   | Warnant         | Management Science, 2000  |                                                                                           |
| 11   | Namur           | Management Science, 2000  | Demande de la province de Namur                                                           |
| 12   | Péronnes        | Management Science, 2000  |                                                                                           |
| 13   | Mons            | Management Science, 2000  | Demande de la province du Hainaut                                                         |
| 14   | Blaregnies      | Management Science, 2000  | Demande pour la France                                                                    |
| 15   | Wanze           | Management Science, 2000  |                                                                                           |
| 16   | Arlon           | Management Science, 2000  | Demande de la province du Luxembourg                                                      |
| 17   | Pétange         | Management Science, 2000  | 60/220 de la demande du Grand-Duché du Luxembourg                                         |
| 18   | Poppel          | Carte FIGAZ, Janvier 1988 | 26% de la Norvège + 26% de Blaregnies (demande FR)                                        |
| 19   | Weelde          | Carte FIGAZ, Janvier 1988 |                                                                                           |
| 20   | Winksele        | Carte FIGAZ, Janvier 1988 |                                                                                           |
| 21   | Le Rœulx        | Carte FIGAZ, Janvier 1988 |                                                                                           |
| 22   | Bruxelles       | Carte Fluxys, 2021c       | Demande de la province de Brabant                                                         |
| 23   | Eynatten        | Carte Fluxys, 2021c       | Offre "autres fournisseurs"                                                               |
| 24   | Opwijk          | Carte Fluxys, 2021c       |                                                                                           |
| 25   | Alveringem      | Carte Fluxys, 2021c       | Offre France                                                                              |
| 26   | Hasselt         | Carte FIGAZ, Janvier 1988 | Demande de la province du Limbourg                                                        |
| 27   | Bras            | Carte Fluxys, 2021c       | 160/220 de la demande du Grand-Duché du Luxembourg                                        |

Tableau 17 – Hypothèses et sources pour les nœuds du réseau

Pour les pourcentages de l'offre en provenance de Norvège, nous avons consulté, le 23 mai 2024, les capacités d'entrée de gaz des points d'interconnexion où le gaz norvégien peut entrer dans le réseau belge<sup>9</sup>. Nous avons ensuite calculé la part de la capacité totale d'entrée attribuée à chaque point. Pour déterminer le volume de gaz passant par chaque point d'interconnexion, nous avons pris l'offre journalière venant de Norvège, soit  $60,785 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ , et l'avons répartie selon le pourcentage de gaz passant par chaque point. Ces données sont présentées dans le tableau 18.

| Point d'entrée      | Capacité<br>d'entrée<br>[kWh/h] | Norvège<br>pour Belux | Pourcentage | Par point | Volume<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jour] |  |  |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------|-----------|--------------------------------------------------|--|--|
| Blaregnies          | 6 000 000                       | 1                     | 26 %        | 26,00 %   | 15,804                                           |  |  |
| Poppel/Hilvarenbeek | 26 950 000                      |                       |             |           |                                                  |  |  |
| Alveringem          | 912 500                         |                       |             |           |                                                  |  |  |
| Zeebrugge (from UK) | 8 513 541                       | 1                     | 19 %        | 55,00 %   | 33,432                                           |  |  |
| Norway ZTP          | 20 150 000                      |                       |             |           |                                                  |  |  |
| Zeebrugge Firm      | 36 452 235                      | 1                     | 35 %        | 19,00 %   | 11,5490                                          |  |  |
| Zeebrugge LNG       | 27 870 000                      | 1                     |             |           |                                                  |  |  |
| ‘s Gravenvoeren     | 20 150 000                      |                       |             |           |                                                  |  |  |
| Total               | 140 998 276                     | 103 702 235           | 100 %       | 100,00 %  | 60,785                                           |  |  |

Tableau 18 – Capacité d'entrée pour le gaz venant de Norvège

---

<sup>9</sup> Nous faisons l'hypothèse que, lorsque le gaz L ne sera plus disponible, le gaz en provenance de Norvège pourra arriver via Poppel.

Pour calculer les pourcentages des différents points d'entrée du gaz en [transit vers la France](#), nous avons utilisé le même raisonnement que pour l'offre en provenance de Norvège, décrit ci-dessus. Les données sont disponibles dans le tableau 19.

| Point d'entrée      | Capacité d'entrée [kWh/h] | Transit pour la France | Pourcentage | Volume [ $10^6 m^3/jour$ ] |
|---------------------|---------------------------|------------------------|-------------|----------------------------|
| Blaregnies          | 6 000 000                 | 1                      | 26,00 %     | 3,487                      |
| Poppel/Hilvarenbeek | 26 950 000                |                        |             |                            |
| Alveringem          | 912 500                   |                        |             |                            |
| Zeebrugge (from UK) | 8 513 541                 | 1                      | 55,00 %     | 7,376                      |
| Norway ZTP          | 20 150 000                |                        |             |                            |
| Zeebrugge Firm      | 36 452 235                |                        |             |                            |
| Zeebrugge LNG       | 27 870 000                | 1                      | 19,00 %     | 2,547                      |
| 's Gravenvoeren     | 20 150 000                |                        |             |                            |
| Total               | 140 998 276               | 103 702 235            | 100,00 %    | 13,410                     |

Tableau 19 - Capacité d'entrée pour le gaz en transit vers la France

## Annexe 6 – Données d'importation et d'exportation de gaz vers et depuis le Belgique

|         | France (L) | France (H) | Pays-Bas (L) | Pays-Bas (H) | Luxembourg (H) | Allemagne (H) | Royaume-Uni (H) | Norvège (H) | GNL  |
|---------|------------|------------|--------------|--------------|----------------|---------------|-----------------|-------------|------|
| janv-21 | -3,9       | -4,8       | 10,8         | 11           | -0,4           | 8,3           | -13,5           | 14,6        | 2,1  |
| févr-21 | -0,6       | -1         | 6,3          | 2,5          | -0,6           | 2,9           | -3,2            | 12,9        | 0,2  |
| mars-21 | -4,4       | 0,4        | 9,5          | -1,3         | -0,9           | -2,1          | -2,3            | 13,6        | 7,8  |
| avr-21  | -4,3       | 1          | 8,8          | -4,2         | -0,8           | -1,6          | -0,2            | 12,8        | 8,6  |
| mai-21  | -5,1       | -1,7       | 8,3          | -5,7         | -0,6           | -0,3          | -0,5            | 13,2        | 6,4  |
| juin-21 | -1,6       | -2,2       | 3            | -5,2         | -0,4           | -0,2          | 0               | 14,1        | 2,6  |
| juil-21 | -3,7       | -2,2       | 5            | -4,5         | -0,3           | 0             | 0               | 14,5        | 2,6  |
| août-21 | -3,6       | -5         | 4,9          | -2,8         | -0,2           | 0             | 0               | 14,5        | 2,2  |
| sept-21 | -2,8       | -0,7       | 4,3          | -5,3         | -0,4           | -1,3          | 3,4             | 12,1        | 1,8  |
| oct-21  | -4,4       | -0,6       | 7,1          | -6,9         | -0,6           | -8,3          | 9,9             | 14,6        | 5,3  |
| nov-21  | -2         | -0,1       | 6,2          | -3,9         | -0,8           | -2,3          | 2,7             | 13,9        | 3    |
| déc-21  | -5,7       | -2,3       | 10,5         | 2            | -0,9           | -3,2          | 3               | 14,5        | 3,1  |
| janv-22 | -0,6       | 6,5        | 5,6          | -4           | -1,1           | -10,8         | 2,4             | 14,6        | 8,5  |
| févr-22 | -1,1       | 6,7        | 5,2          | -5,9         | -0,9           | -14,4         | 6               | 13,4        | 6,4  |
| mars-22 | -3         | 5          | 6,3          | -8,4         | -0,8           | -16,3         | 10,4            | 14,6        | 8,7  |
| avr-22  | -2,2       | 3,3        | 4,8          | -11          | -0,6           | -23,9         | 17              | 14,2        | 11,9 |
| mai-22  | -3,1       | 5,3        | 4,6          | -13          | -0,4           | -23,3         | 19              | 14,7        | 9,5  |
| juin-22 | -1,6       | 2,8        | 2,7          | -12          | -0,3           | -23,9         | 18,1            | 14,2        | 12,2 |
| juil-22 | -2,8       | 4          | 3,8          | -13,4        | -0,3           | -25,5         | 18,5            | 13,9        | 11,8 |
| août-22 | -3         | 7,3        | 3,9          | -13,2        | -0,2           | -25,5         | 17,5            | 14,5        | 10,7 |
| sept-22 | -4,5       | 6,5        | 5,6          | -12,7        | -0,4           | -24,6         | 18,9            | 13,5        | 8,8  |
| oct-22  | -3,6       | 5,7        | 4,9          | -12,6        | -0,4           | -25,3         | 18,4            | 14,5        | 11,9 |
| nov-22  | -2,3       | 7,1        | 4,5          | -9,4         | -0,6           | -21           | 8,8             | 14          | 11,2 |
| déc-22  | -2,8       | 7,1        | 6,2          | -9,1         | -0,8           | -21,9         | 13,3            | 14,5        | 12,1 |
| janv-23 | -1         | 7,1        | 4,5          | -7,6         | -0,8           | -21,4         | 10,6            | 14,8        | 12,9 |
| févr-23 | -0,3       | 6,7        | 3,2          | -7,2         | -0,8           | -20           | 11,1            | 13,3        | 9,6  |
| mars-23 | -1         | 0,6        | 4            | -4,8         | -0,7           | -20,7         | 11,2            | 14,8        | 13,6 |
| avr-23  | -3,4       | 1,6        | 5,7          | -10,8        | -0,6           | -24,1         | 17,9            | 14,4        | 13,7 |
| mai-23  | -2,8       | 3,8        | 4,1          | -11,9        | -0,4           | -24,4         | 18,1            | 14          | 11,7 |
| juin-23 | -1,9       | 4,3        | 2,5          | -7,3         | -0,3           | -13,9         | 5,1             | 13          | 7,6  |
| juil-23 | -2,5       | -0,1       | 3,2          | -6,9         | -0,3           | -14,8         | 8,2             | 14,7        | 8,4  |
| août-23 | -2,3       | -2,4       | 3            | -6,1         | -0,3           | -11           | 6,7             | 14          | 7,9  |
| sept-23 | -2,6       | 4          | 3,4          | -4,2         | -0,3           | -8,9          | 2,6             | 9           | 6,4  |
| oct-23  | -1,7       | 3,2        | 2,8          | -5,8         | -0,5           | -16,8         | 6               | 14,4        | 9,6  |
| nov-23  | -1,2       | 8          | 3            | -6,3         | -0,7           | -17,3         | 3,7             | 13,8        | 12,3 |
| déc-23  | -0,5       | 7,6        | 2,4          | -3,2         | -0,8           | -19           | 6,8             | 14,3        | 9    |
| janv-24 | -1,5       | 8,1        | 4            | 0,5          | -1             | -14,7         | 0,7             | 14,4        | 8    |
| févr-24 | -0,4       | 7,6        | 2,1          | -2,8         | -0,7           | -13,4         | 0,7             | 13,7        | 8    |
| mars-24 | -0,4       | 6,4        | 2            | -6,3         | -0,7           | -13,2         | -0,1            | 14,6        | 12,8 |
| avr-24  | -0,9       | 4,9        | 2,3          | -5,9         | -0,6           | -13,9         | 2,4             | 14,1        | 9,6  |

|                  | France (L) | France (H) | Pays-Bas (L) | Pays-Bas (H) | Luxembourg (H) | Allemagne (H) | Royaume-Uni (H) | Norvège (H) | GNL  |
|------------------|------------|------------|--------------|--------------|----------------|---------------|-----------------|-------------|------|
| Moyenne 6 mois   | -0,817     | 7,100      | 2,633        | -4,000       | -0,750         | -15,250       | 2,367           | 14,150      | 9,95 |
| Rapport Pays/Lux | 1,08933    | -9,4666    |              | 5,333333     |                | 20,33333      |                 |             |      |

Tableau 20 - Données d'importation et d'exportation de gaz vers et depuis le Belgique (TWh) (SPF Économie, consulté le 15 juin 2024)

## Annexe 7 – Scénarios : Hypothèses des nœuds du réseau

| Nœud | Ville           | Référence volume                                                                                                                              |
|------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Zeebruges       | 55% de l'offre de la Norvège + Offre Qatar<br>+ Offre UK + Demande Pays-Bas +<br>Demande Allemagne - Offre France (H) +<br>Demande France (L) |
| 2    | Bruges          | Demande de la province de Flandre<br>occidentale                                                                                              |
| 3    | Zomergem        |                                                                                                                                               |
| 4    | Loenhout        | Capacité de déstockage de Loenhout                                                                                                            |
| 5    | Anvers          | Demande de la province d'Anvers                                                                                                               |
| 6    | Gand            | Demande de la province de Flandre<br>orientale                                                                                                |
| 7    | 's Gravenvoeren | 19% de l'offre de la Norvège + Pétange +<br>Bras                                                                                              |
| 8    | Berneau         |                                                                                                                                               |
| 9    | Liège           | Demande de la province de Liège                                                                                                               |
| 10   | Warnant         |                                                                                                                                               |
| 11   | Namur           | Demande de la province de Namur                                                                                                               |
| 12   | Péronnes        |                                                                                                                                               |
| 13   | Mons            | Demande de la province du Hainaut                                                                                                             |
| 14   | Blaregnies      | Transit pour la France                                                                                                                        |
| 15   | Wanze           |                                                                                                                                               |
| 16   | Arlon           | Demande de la province du Luxembourg                                                                                                          |
| 17   | Pétange         | 60/220 de la demande du Grand-Duché du<br>Luxembourg                                                                                          |
| 18   | Poppel          | 26% de la Norvège –<br>Demande Pays-Bas                                                                                                       |
| 19   | Weelde          |                                                                                                                                               |
| 20   | Winksele        |                                                                                                                                               |
| 21   | Le Rœulx        |                                                                                                                                               |
| 22   | Bruxelles       | Demande de la province de Brabant                                                                                                             |
| 23   | Eynatten        | Offre "autres fournisseurs" – Demande<br>Allemagne                                                                                            |
| 24   | Opwijk          |                                                                                                                                               |
| 25   | Alveringem      | Offre France (dont France H)                                                                                                                  |
| 26   | Hasselt         | Demande de la province du Limbourg                                                                                                            |
| 27   | Bras            | 160/220 de la demande du Grand-Duché du<br>Luxembourg                                                                                         |

Tableau 21 - Scénarios – Hypothèses des nœuds du réseau

Pour les pourcentages de **la demande des Pays-Bas**, nous avons consulté, le 23 mai 2024, les capacités d'entrée de gaz des points d'interconnexion où le gaz à destination des Pays-Bas peut entrer dans le réseau belge. Nous avons ensuite calculé la part de la capacité totale d'entrée attribuée à chaque point. Ces données sont présentées dans le tableau 22. Cependant, Alveringem étant à 1,59% et ce pourcentage étant négligeable, nous estimons alors que toute la demande servant à fournir les Pays-Bas arrive sur le réseau belge via Zeebruges.

| Point d'entrée      | Capacité d'entrée [kWh/h] | Transit pour Pays-Bas | Pourcentage |
|---------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| Blaregnies          | 6 000 000                 | 1                     | 1,59%       |
| Poppel/Hilvarenbeek | 26 950 000                |                       |             |
| Alveringem          | 912 500                   |                       |             |
| Zeebrugge (from UK) | 8 513 541                 | 1                     | 63,38%      |
| Norway ZTP          | 20 150 000                |                       |             |
| Zeebrugge Firm      | 36 452 235                |                       |             |
| Zeebrugge LNG       | 27 870 000                | 1                     | 100,00%     |
| 's Gravenvoeren     | 20 150 000                |                       |             |
| Total               | 140 998 276               | 57 514 735            | 100,00%     |

*Tableau 22 - Capacité d'entrée pour le gaz à destination des Pays-Bas*

## Annexe 8 – Modèle GAMS avec compresseurs

```
SET I the nodes of the network
    /Alveringem, Antwerpen, Arlon, Berneau-in, Berneau-out, Blaregnies, Bras,
    Brugge, Bruxelles,
    Eynatten, Gent, Hasselt, Le_Roeulx, Liege, Loenhout, Mons, Namur, Opwijk,
    Peronnes,
    Petange, Poppel, Voeren, Wanze, Warnant, Weelde-in, Weelde-out, Winksele-
    in, Winksele-out,
    Zeebrugge, Zomergem/;
```

```
ALIAS (I,J);
```

```
SET DEM(I) the demand nodes
    /Antwerpen, Arlon, Brugge, Bruxelles, Gent, Hasselt, Liege, Mons, Namur,
    Blaregnies, Petange, Bras/;
```

```
SET SUPP(I) the supply nodes
    /Alveringem, Eynatten, Loenhout, Poppel, Voeren, Zeebrugge/;
```

```
SET A(I,J) the arcs of the network
    /Zeebrugge.Brugge
    Brugge.Zomergem
    Loenhout.Antwerpen
    Gent.Antwerpen
    Zomergem.Gent
    Zomergem.Peronnes
    Voeren.Berneau-in
    Berneau-in.Berneau-out
    Berneau-out.Liege
    Liege.Warnant
    Warnant.Namur
    Peronnes.Namur
    Peronnes.Mons
    Mons.Blaregnies
    Warnant.Wanze
    Wanze.Arlon
    Arlon.Petange
    Poppel.Weelde-in
    Weelde-in.Weelde-out
    Weelde-out.Winksele-in
    Winksele-in.Winksele-out
    Winksele-out.Le_Roeulx
    Le_Roeulx.Mons
    Weelde-out.Antwerpen
    Weelde-out.Hasselt
    Berneau-out.Hasselt
```

Eynatten.Berneau-in  
 Berneau-out.Winksele-in  
 Winksele-out.Bruxelles  
 Opwijk.Bruxelles  
 Gent.Opwijk  
 Berneau-out.Bras  
 Alveringem.Brugge  
 Loenhout.Winksele-out/;

**SET** PA(I,J) the passives arcs of the network

/Zeebrugge.Brugge  
 Brugge.Zomergem  
 Loenhout.Antwerpen  
 Gent.Antwerpen  
 Zomergem.Gent  
 Zomergem.Peronnes  
 Voeren.Berneau-in  
 Berneau-out.Liege  
 Liege.Warnant  
 Warnant.Namur  
 Peronnes.Namur  
 Peronnes.Mons  
 Mons.Blaregnies  
 Warnant.Wanze  
 Wanze.Arlon  
 Arlon.Petange  
 Poppel.Weelde-in  
 Weelde-out.Winksele-in  
 Winksele-out.Le\_Roeulx  
 Le\_Roeulx.Mons  
 Weelde-out.Antwerpen  
 Weelde-out.Hasselt  
 Berneau-out.Hasselt  
 Eynatten.Berneau-in  
 Berneau-out.Winksele-in  
 Winksele-out.Bruxelles  
 Opwijk.Bruxelles  
 Gent.Opwijk  
 Berneau-out.Bras  
 Alveringem.Brugge  
 Loenhout.Winksele-out/;

**SET** AA(I,J) actives arcs of the network

/Berneau-in.Berneau-out  
 Weelde-in.Weelde-out  
 Winksele-in.Winksele-out/;

SCALAR GAMA1 /0.167/  
 GAMA2 /0.236/  
 GAMA3 /1.6/;

PARAMETERS PCMAX(I,J) Maximal power of compressors (kW)  
 /Berneau-in.Berneau-out 20888  
 Weelde-in.Weelde-out 158489  
 Winksele-in.Winksele-out 107357/;

PARAMETERS S(I) Maximum supply at node I  
 /Zeebrugge 58.537  
 Brugge -13.660  
 Zomergem 0.0  
 Loenhout 14.971  
 Antwerpen -22.818  
 Gent -13.139  
 Voeren 14.756  
 Berneau-in 0.0  
 Berneau-out 0.0  
 Liege -7.488  
 Warnant 0.0  
 Namur -3.274  
 Peronnes 0.0  
 Mons -12.770  
 Blaregnies -13.410  
 Wanze 0.0  
 Arlon -0.788  
 Petange -0.180  
 Poppel 19.291  
 Weelde-in 0.0  
 Weelde-out 0.0  
 Winksele-in 0.0  
 Winksele-out 0.0  
 Le\_Roeulx 0.0  
 Bruxelles -20.084  
 Eynatten 2.533  
 Opwijk 0.0  
 Alveringem 4.221  
 Hasselt -6.218  
 Bras -0.480/

PRESMIN(I) Minimum pressure at node I  
 /Zeebrugge 55.0  
 Brugge 30.0  
 Zomergem 0.0  
 Loenhout 60.0  
 Antwerpen 30.0

|              |       |
|--------------|-------|
| Gent         | 30.0  |
| Voeren       | 49.0  |
| Berneau-in   | 0.0   |
| Berneau-out  | 0.0   |
| Liege        | 30.0  |
| Warnant      | 0.0   |
| Namur        | 30.0  |
| Peronnes     | 0.0   |
| Mons         | 30.0  |
| Blaregnies   | 49.0  |
| Wanze        | 0.0   |
| Arlon        | 30.0  |
| Petange      | 27.0  |
| Poppel       | 49.0  |
| Weelde-in    | 0.0   |
| Weelde-out   | 0.0   |
| Winksele-in  | 0.0   |
| Winksele-out | 0.0   |
| Le_Roeulx    | 0.0   |
| Bruxelles    | 30.0  |
| Eynatten     | 55.0  |
| Opwijk       | 0.0   |
| Alveringem   | 55.0  |
| Hasselt      | 30.0  |
| Bras         | 27.0/ |

PRESMAX(I) Maximum pressure at node I

|             |      |
|-------------|------|
| /Zeebrugge  | 80.0 |
| Brugge      | 80.0 |
| Zomergem    | 80.0 |
| Loenhout    | 80.0 |
| Antwerpen   | 80.0 |
| Gent        | 80.0 |
| Voeren      | 66.2 |
| Berneau-in  | 66.2 |
| Berneau-out | 66.2 |
| Liege       | 66.2 |
| Warnant     | 66.2 |
| Namur       | 66.2 |
| Peronnes    | 66.2 |
| Mons        | 66.2 |
| Blaregnies  | 66.2 |
| Wanze       | 66.2 |
| Arlon       | 66.2 |
| Petange     | 66.2 |
| Poppel      | 66.2 |
| Weelde-in   | 66.2 |

|              |       |
|--------------|-------|
| Weelde-out   | 66.2  |
| Winksele-in  | 80.0  |
| Winksele-out | 80.0  |
| Le_Roeulx    | 66.2  |
| Bruxelles    | 66.2  |
| Eynatten     | 80.0  |
| Opwijk       | 80.0  |
| Alveringem   | 84.5  |
| Hasselt      | 66.2  |
| Bras         | 66.2/ |

|                         |              |              |
|-------------------------|--------------|--------------|
| CSQUARE(I,J)            | CIJ square   | of the pipe. |
| /Zeebrugge.Brugge       | 14.51243992  |              |
| Brugge.Zomergem         | 1.39542691   |              |
| Loenhout.Antwerpen      | 0.10025586   |              |
| Gent.Antwerpen          | 0.14865524   |              |
| Zomergem.Gent           | 12.05436956  |              |
| Zomergem.Peronnes       | 0.65965636   |              |
| Voeren.Berneau-in       | 9.13503213   |              |
| Berneau-out.Liege       | 2.28375803   |              |
| Liege.Warnant           | 1.82700643   |              |
| Warnant.Namur           | 0.86383571   |              |
| Peronnes.Namur          | 0.80624666   |              |
| Peronnes.Mons           | 3.62810998   |              |
| Mons.Blaregnies         | 11.16341532  |              |
| Warnant.Wanze           | 0.05144449   |              |
| Wanze.Arlon             | 0.00134608   |              |
| Arlon.Petange           | 0.02781900   |              |
| Poppel.Weelde-in        | 54.42164968  |              |
| Weelde-out.Winksele-in  | 2.04400562   |              |
| Winksele-out.Le_Roeulx  | 2.23268306   |              |
| Le_Roeulx.Mons          | 10.36602851  |              |
| Weelde-out.Antwerpen    | 0.37486974   |              |
| Weelde-out.Hasselt      | 0.06632311   |              |
| Berneau-out.Hasselt     | 0.10777505   |              |
| Eynatten.Berneau-in     | 11.83044999  |              |
| Berneau-out.Winksele-in | 4.99507888   |              |
| Winksele-out.Bruxelles  | 21.40748093  |              |
| Opwijk.Bruxelles        | 18.73154582  |              |
| Gent.Opwijk             | 11.23892749  |              |
| Berneau-out.Bras        | 0.01824842   |              |
| Alveringem.Brugge       | 0.51949993   |              |
| Loenhout.Winksele-out   | 0.48053744/; |              |

#### VARIABLES

FLOW(I,J) Gas flow through arc from I to J

H Total mecanical energy dissipated in the pipes

Z            Objective function: minimize the energy used in the compressors  
 W(I,J)      Power used in the compressor  
 PI(I)       Square of pressure at node I  
 P(I)        Pressure at node I;

**POSITIVE VARIABLE P;**

#### **EQUATIONS**

COMPUTEME            Compute the mechanical energy  
 BALANCE(I)           Flow conservation at node I  
 UTICOSTS             Objective function: minimize the energy used in the  
 compressors  
 LOWERP(I)            Lower bound on pressure at node I  
 UPPERP(I)            Upper bound on pressure at node I  
 FLOW\_PA(I,J)         Flow in the arc and the pressure at the two ends of the  
 pipe + valves  
 POW\_COMPRES(I,J)    Power used by compressors to increase pressure  
 PRESSURE(I,J)        Upper limit on the maximal pressure increase ratio  
 FLOW\_AA(I,J)         Flow in the active arcs  
 MAXPOW(I,J)         Maximum power in compressors  
 MINPOW(I,J)         Minimum power in compressors ( $\geq 0$ )  
 ;

**\*\*\* OBJECTIVE FUNCTIONS \*\*\***

*\*Model FIRST\**

COMPUTEME.. H =E=   
 SUM((I,J)\$PA(I,J),ABS(FLOW(I,J))\*FLOW(I,J)\*FLOW(I,J)/(3\*CSQUARE(I,J)));

*\*Model SECOND\**

UTICOSTS.. Z =E= SUM((I,J)\$AA(I,J), W(I,J));

**\*\*\* CONSTRAINTS \*\*\***

*\*Model FIRST\**

BALANCE(I).. SUM(J\$A(I,J),FLOW(I,J)) =E= SUM(J\$A(J,I),FLOW(J,I)) + S(I);

*\*Model SECOND\**

LOWERP(I).. PI(I) =G= PRESMIN(I)\*PRESMIN(I);

UPPERP(I).. PI(I) =L= PRESMAX(I)\*PRESMAX(I);

FLOW\_PA(I,J)\$PA(I,J).. FLOW(I,J)\*FLOW(I,J) =L=  
SIGN(FLOW(I,J))\*CSQUARE(I,J)\*(PI(I)-PI(J));

POW\_COMPRES(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =E= GAMA1\*10\*\*6\*FLOW(I,J)/24\*(  
(SQRT(PI(J))/SQRT(PI(I)))\*GAMA2 - 1.0 );

PRESSURE(I,J)\$AA(I,J).. SQRT(PI(J)) =L= GAMA3\*SQRT(PI(I));

FLOW\_AA(I,J)\$AA(I,J).. FLOW(I,J) =G= 0.0;

MAXPOW(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =L= PCMAX(I,J);

MINPOW(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =G= 0.0;

**MODEL FIRST / COMPUTEME, BALANCE/;**

**SOLVE FIRST USING DNLP MINIMIZING H;**

PI.l(I)=BALANCE.m(I)-SMIN(J,BALANCE.m(J));

**DISPLAY PI.l;**

**MODEL SECOND / UTICOSTS, BALANCE, LOWERP, UPPERP, FLOW\_PA, POW\_COMPRES,  
PRESSURE, FLOW\_AA, MAXPOW, MINPOW /;**

**SOLVE SECOND USING DNLP MINIMIZING Z;**

P.L(I)=SQRT(PI.L(I));

**DISPLAY P.L;**

## Annexe 9 – Modèle GAMS scénarios

```

SET I the nodes of the network
    /Alveringem, Antwerpen, Arlon, Berneau-in, Berneau-out, Blaregnies, Bras,
    Brugge, Bruxelles,
    Eynatten, Gent, Hasselt, Le_Roeulx, Liege, Loenhout, Mons, Namur, Opwijk,
    Peronnes,
    Petange, Poppel, Voeren, Wanze, Warnant, Weelde-in, Weelde-out, Winksele-
    in, Winksele-out,
    Zeebrugge, Zomergem/;

```

```

ALIAS (I,J);

```

```

SET DEM(I) the demand nodes
    /Antwerpen, Arlon, Brugge, Bruxelles, Gent, Hasselt, Liege, Mons, Namur,
    Blaregnies, Petange, Bras/;

```

```

SET SUPP(I) the supply nodes
    /Alveringem, Eynatten, Loenhout, Poppel, Voeren, Zeebrugge/;

```

```

SET A(I,J) the arcs of the network
    /Zeebrugge.Brugge
    Brugge.Zomergem
    Loenhout.Antwerpen
    Gent.Antwerpen
    Zomergem.Gent
    Zomergem.Peronnes
    Voeren.Berneau-in
    Berneau-in.Berneau-out
    Berneau-out.Liege
    Warnant.Liege
    Namur.Warnant
    Peronnes.Namur
    Peronnes.Mons
    Mons.Blaregnies
    Warnant.Wanze
    Wanze.Arlon
    Arlon.Petange
    Poppel.Weelde-in
    Weelde-in.Weelde-out
    Winksele-in.Weelde-out
    Winksele-out.Winksele-in
    Winksele-out.Le_Roeulx
    Le_Roeulx.Mons
    Weelde-out.Antwerpen
    Weelde-out.Hasselt
    Berneau-out.Hasselt

```

Berneau-in.Eynatten  
 Winksele-in.Berneau-out  
 Bruxelles.Winksele-out  
 Opwijk.Bruxelles  
 Gent.Opwijk  
 Berneau-out.Bras  
 Alveringem.Brugge  
 Loenhout.Winksele-out/;

**SET** PA(I,J) the passives arcs of the network

/Zeebrugge.Brugge  
 Brugge.Zomergem  
 Loenhout.Antwerpen  
 Gent.Antwerpen  
 Zomergem.Gent  
 Zomergem.Peronnes  
 Voeren.Berneau-in  
 Berneau-out.Liege  
 Warnant.Liege  
 Namur.Warnant  
 Peronnes.Namur  
 Peronnes.Mons  
 Mons.Blaregnies  
 Warnant.Wanze  
 Wanze.Arlon  
 Arlon.Petange  
 Poppel.Weelde-in  
 Winksele-in.Weelde-out  
 Winksele-out.Le\_Roeulx  
 Le\_Roeulx.Mons  
 Weelde-out.Antwerpen  
 Weelde-out.Hasselt  
 Berneau-out.Hasselt  
 Berneau-in.Eynatten  
 Winksele-in.Berneau-out  
 Bruxelles.Winksele-out  
 Opwijk.Bruxelles  
 Gent.Opwijk  
 Berneau-out.Bras  
 Alveringem.Brugge  
 Loenhout.Winksele-out/;

**SET** AA(I,J) actives arcs of the network

/Berneau-in.Berneau-out  
 Weelde-in.Weelde-out  
 Winksele-out.Winksele-in/;

SCALAR GAMA1 /0.167/  
 GAMA2 /0.236/  
 GAMA3 /1.6/;

PARAMETERS PCMAX(I,J) Maximal power of compressors (kW)  
 /Berneau-in.Berneau-out 20888  
 Weelde-in.Weelde-out 158489  
 Winksele-in.Winksele-out 107357/;

PARAMETERS S(I) Maximum supply at node I  
 /Zeebrugge 66.793  
 Brugge -13.660  
 Zomergem 0.0  
 Loenhout 14.971  
 Antwerpen -22.818  
 Gent -13.139  
 Voeren 12.209  
 Berneau-in 0.0  
 Berneau-out 0.0  
 Liege -7.488  
 Warnant 0.0  
 Namur -3.274  
 Peronnes 0.0  
 Mons -12.770  
 Blaregnies -0.719  
 Wanze 0.0  
 Arlon -0.788  
 Petange -0.180  
 Poppel 12.284  
 Weelde-in 0.0  
 Weelde-out 0.0  
 Winksele-in 0.0  
 Winksele-out 0.0  
 Le\_Roeulx 0.0  
 Bruxelles -20.084  
 Eynatten -10.887  
 Opwijk 0.0  
 Alveringem 6.248  
 Hasselt -6.218  
 Bras -0.480/

PRESMIN(I) Minimum pressure at node I  
 /Zeebrugge 55.0  
 Brugge 30.0  
 Zomergem 0.0  
 Loenhout 60.0  
 Antwerpen 30.0

|              |       |
|--------------|-------|
| Gent         | 30.0  |
| Voeren       | 49.0  |
| Berneau-in   | 0.0   |
| Berneau-out  | 0.0   |
| Liege        | 30.0  |
| Warnant      | 0.0   |
| Namur        | 30.0  |
| Peronnes     | 0.0   |
| Mons         | 30.0  |
| Blaregnies   | 49.0  |
| Wanze        | 0.0   |
| Arlon        | 30.0  |
| Petange      | 27.0  |
| Poppel       | 49.0  |
| Weelde-in    | 0.0   |
| Weelde-out   | 0.0   |
| Winksele-in  | 0.0   |
| Winksele-out | 0.0   |
| Le_Roeulx    | 0.0   |
| Bruxelles    | 30.0  |
| Eynatten     | 55.0  |
| Opwijk       | 0.0   |
| Alveringem   | 55.0  |
| Hasselt      | 30.0  |
| Bras         | 27.0/ |

PRESMAX(I) Maximum pressure at node I

|             |      |
|-------------|------|
| /Zeebrugge  | 80.0 |
| Brugge      | 80.0 |
| Zomergem    | 80.0 |
| Loenhout    | 80.0 |
| Antwerpen   | 80.0 |
| Gent        | 80.0 |
| Voeren      | 66.2 |
| Berneau-in  | 66.2 |
| Berneau-out | 66.2 |
| Liege       | 66.2 |
| Warnant     | 66.2 |
| Namur       | 66.2 |
| Peronnes    | 66.2 |
| Mons        | 66.2 |
| Blaregnies  | 66.2 |
| Wanze       | 66.2 |
| Arlon       | 66.2 |
| Petange     | 66.2 |
| Poppel      | 66.2 |
| Weelde-in   | 66.2 |

|              |       |
|--------------|-------|
| Weelde-out   | 66.2  |
| Winksele-in  | 80.0  |
| Winksele-out | 80.0  |
| Le_Roeulx    | 66.2  |
| Bruxelles    | 66.2  |
| Eynatten     | 80.0  |
| Opwijk       | 80.0  |
| Alveringem   | 84.5  |
| Hasselt      | 66.2  |
| Bras         | 66.2/ |

|                         |              |              |
|-------------------------|--------------|--------------|
| CSQUARE(I,J)            | CIJ square   | of the pipe. |
| /Zeebrugge.Brugge       | 14.51243992  |              |
| Brugge.Zomergem         | 1.39542691   |              |
| Loenhout.Antwerpen      | 0.10025586   |              |
| Gent.Antwerpen          | 0.14865524   |              |
| Zomergem.Gent           | 12.05436956  |              |
| Zomergem.Peronnes       | 0.65965636   |              |
| Voeren.Berneau-in       | 9.13503213   |              |
| Berneau-out.Liege       | 2.28375803   |              |
| Warnant.Liege           | 1.82700643   |              |
| Namur.Warnant           | 0.86383571   |              |
| Peronnes.Namur          | 0.80624666   |              |
| Peronnes.Mons           | 3.62810998   |              |
| Mons.Blaregnies         | 11.16341532  |              |
| Warnant.Wanze           | 0.05144449   |              |
| Wanze.Arlon             | 0.00134608   |              |
| Arlon.Petange           | 0.02781900   |              |
| Poppel.Weelde-in        | 54.42164968  |              |
| Winksele-in.Weelde-out  | 2.04400562   |              |
| Winksele-out.Le_Roeulx  | 2.23268306   |              |
| Le_Roeulx.Mons          | 10.36602851  |              |
| Weelde-out.Antwerpen    | 0.37486974   |              |
| Weelde-out.Hasselt      | 0.06632311   |              |
| Berneau-out.Hasselt     | 0.10777505   |              |
| Berneau-in.Eynatten     | 11.83044999  |              |
| Winksele-in.Berneau-out | 4.99507888   |              |
| Bruxelles.Winksele-out  | 21.40748093  |              |
| Opwijk.Bruuxelles       | 18.73154582  |              |
| Gent.Opwijk             | 11.23892749  |              |
| Berneau-out.Bras        | 0.01824842   |              |
| Alveringem.Brugge       | 0.51949993   |              |
| Loenhout.Winksele-out   | 0.48053744/; |              |

#### VARIABLES

FLOW(I,J) Gas flow through arc from I to J

H Total mecanical energy dissipated in the pipes

Z            Objective function: minimize the energy used in the compressors  
 W(I,J)      Power used in the compressor  
 PI(I)       Square of pressure at node I  
 P(I)        Pressure at node I;

**POSITIVE VARIABLE P;**

#### **EQUATIONS**

COMPUTEME            Compute the mechanical energy  
 BALANCE(I)           Flow conservation at node I  
 UTICOSTS             Objective function: minimize the energy used in the  
 compressors  
 LOWERP(I)            Lower bound on pressure at node I  
 UPPERP(I)            Upper bound on pressure at node I  
 FLOW\_PA(I,J)        Flow in the arc and the pressure at the two ends of the  
 pipe + valves  
 POW\_COMPRES(I,J)    Power used by compressors to increase pressure  
 PRESSURE(I,J)        Upper limit on the maximal pressure increase ratio  
 FLOW\_AA(I,J)        Flow in the active arcs  
 MAXPOW(I,J)         Maximum power in compressors  
 MINPOW(I,J)         Minimum power in compressors ( $\geq 0$ )  
 ;

**\*\*\* OBJECTIVE FUNCTIONS \*\*\***

*\*Model FIRST\**

COMPUTEME.. H =E=   
 SUM((I,J)\$PA(I,J),ABS(FLOW(I,J))\*FLOW(I,J)\*FLOW(I,J)/(3\*CSQUARE(I,J)));

*\*Model SECOND\**

UTICOSTS.. Z =E= SUM((I,J)\$AA(I,J), W(I,J));

**\*\*\* CONSTRAINTS \*\*\***

*\*Model FIRST\**

BALANCE(I).. SUM(J\$A(I,J),FLOW(I,J)) =E= SUM(J\$A(J,I),FLOW(J,I)) + S(I);

*\*Model SECOND\**

LOWERP(I).. PI(I) =G= PRESMIN(I)\*PRESMIN(I);

UPPERP(I).. PI(I) =L= PRESMAX(I)\*PRESMAX(I);

FLOW\_PA(I,J)\$PA(I,J).. FLOW(I,J)\*FLOW(I,J) =L=  
SIGN(FLOW(I,J))\*CSQUARE(I,J)\*(PI(I)-PI(J));

POW\_COMPRES(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =E= GAMA1\*10\*\*6\*FLOW(I,J)/24\*(  
(SQRT(PI(J))/SQRT(PI(I)))\*GAMA2 - 1.0 );

PRESSURE(I,J)\$AA(I,J).. SQRT(PI(J)) =L= GAMA3\*SQRT(PI(I));

FLOW\_AA(I,J)\$AA(I,J).. FLOW(I,J) =G= 0.0;

MAXPOW(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =L= PCMAX(I,J);

MINPOW(I,J)\$AA(I,J).. W(I,J) =G= 0.0;

**MODEL FIRST / COMPUTEME, BALANCE/;**

**SOLVE FIRST USING DNLP MINIMIZING H;**

PI.l(I)=BALANCE.m(I)-SMIN(J,BALANCE.m(J));

**DISPLAY PI.l;**

**MODEL SECOND / UTICOSTS, BALANCE, LOWERP, UPPERP, FLOW\_PA, POW\_COMPRES,  
PRESSURE, FLOW\_AA, MAXPOW, MINPOW /;**

**SOLVE SECOND USING DNLP MINIMIZING Z;**

P.L(I)=SQRT(PI.L(I));

**DISPLAY P.L;**

## Résumé :

Le marché européen du gaz a subi des changements significatifs au cours des dernières années, notamment la réduction des approvisionnements en gaz pauvre (L) des Pays-Bas et la diminution des importations de gaz russe. Ces évolutions ont des répercussions majeures sur les flux de gaz au sein du réseau belge, nécessitant une analyse approfondie en vue de s'assurer sa résilience et son efficacité.

Ce mémoire traite de l'actualisation des données et de l'analyse de la résilience du réseau de transport de gaz belge aux changements dans l'offre et la demande.

Les résultats de ce mémoire montrent que le réseau de transport de gaz belge est particulièrement résilient face aux changements récents. Grâce aux investissements effectués, il peut s'adapter sans nécessité de nouvelles constructions de gazoducs ou de stations de compression. Les données rectifiées et complétées par Fluxys confirment que, malgré les hypothèses formulées, les conclusions des modèles sont correctes.

**UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN**  
Louvain School of Management

Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve  
Boulevard Emile Devreux 6, 6000 Charleroi, Belgique  
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique

[www.uclouvain.be/lsm](http://www.uclouvain.be/lsm)