

---

Master 2 Econométrie appliquée

Séries temporelles multivariées

---

# Importations de pétrole et de produits pétroliers aux USA

---

Auteures :  
DAHMANI Amel  
ONNO Lilou

Sous la direction de Monsieur MOUSSA Zakaria

---

6 février 2025

---

# Sommaire

1. Introduction
2. Les données
3. Modèle retenu
4. Résultats empiriques
5. Conclusion
6. Discussion

---

## Résumé

Cette étude analyse les dynamiques des importations de pétrole et de produits pétroliers aux États-Unis à l'aide d'un modèle de séries temporelles multivariées. En examinant les interactions entre le prix du pétrole, le prix du gaz naturel, le taux de change USD/EUR et le volume des importations de pétrole et de produits pétroliers de janvier 1999 à décembre 2019, nous mettons en évidence des relations de long terme et des ajustements de court terme entre ces variables. L'estimation d'un modèle VECM confirme l'existence d'une co-intégration, indiquant une interdépendance entre ces facteurs. Une version structurelle du modèle, intégrant des restrictions, permet de tester des hypothèses spécifiques et d'affiner l'interprétation des interactions. Les résultats montrent que les fluctuations des prix énergétiques et du taux de change influencent significativement les volumes importés, mais que ces ajustements s'opèrent progressivement. L'analyse des fonctions impulsions-réponses ne révèle pas d'effet instantané marqué, soulignant la nature graduelle de ces ajustements. Ces résultats mettent en lumière la nécessité d'une approche approfondie des dynamiques structurelles afin d'améliorer l'anticipation des évolutions des importations pétrolières et mieux évaluer leurs impacts.

## Abstract

This study analyzes the dynamics of oil and petroleum product imports in the United States using a multivariate time series model. By examining the interactions between oil prices, natural gas prices, the USD/EUR exchange rate, and the volume of oil and petroleum product imports from January 1999 to December 2019, we highlight long-term relationships and short-term adjustments among these variables. The estimation of a VECM model confirms the existence of cointegration, indicating an interdependence between these factors. A structural version of the model, incorporating restrictions, allows for testing specific hypotheses and refining the interpretation of interactions. The results show that fluctuations in energy prices and the exchange rate significantly influence imported volumes, but these adjustments occur gradually. The impulse response analysis does not reveal an immediate effect, underscoring the gradual nature of these adjustments. These findings highlight the necessity of an in-depth approach to structural dynamics to improve the anticipation of oil import trends and their impacts.

---

# 1 Introduction

L'importation de pétrole brut et de produits pétroliers aux États-Unis est un élément clé de la politique énergétique et de la dynamique macroéconomique du pays. Depuis plusieurs décennies, la dépendance américaine aux importations d'énergie a fluctué en fonction des innovations technologiques, des tensions géopolitiques et des politiques de transition énergétique. L'analyse des séries temporelles multivariées permet de mieux comprendre les déterminants et les tendances de ces importations en relation avec d'autres variables économiques et énergétiques.

L'histoire des importations pétrolières américaines est marquée par des périodes de forte dépendance et des phases de relative autonomie énergétique. Entre les années 1970 et 2000, les États-Unis ont connu une croissance importante de leurs importations, atteignant un pic en 2005 avec environ 60% de la consommation énergétique nationale provenant de l'étranger <sup>1</sup>. Par ailleurs, les États-Unis ont historiquement été parmi les plus grands importateurs mondiaux de pétrole brut, en raison d'une demande intérieure élevée et de la nécessité de diversifier leurs sources d'approvisionnement. Hamilton (2013) souligne que les crises pétrolières des années 1970 ont considérablement modifié la structure des importations américaines, en mettant en lumière la vulnérabilité du pays face aux chocs d'approvisionnement étrangers <sup>2</sup>. Depuis lors, plusieurs stratégies ont été mises en place pour atténuer cette dépendance, notamment l'expansion des réserves stratégiques de pétrole et le développement de sources domestiques d'énergie <sup>3</sup>.

Le rapport annuel de la *BP Statistical Review* de 2021 <sup>4</sup> montre que la croissance des importations américaines a été particulièrement marquée entre les années 1980 et le début des années 2000. Cette augmentation a été favorisée par une hausse de la demande intérieure et une production nationale limitée face aux besoins du marché. Cependant, grâce à l'extraction du gaz de schiste, les États-Unis ont réduit leurs importations à partir des années 2010. D'après Maugeri <sup>5</sup>, l'augmentation de la production domestique de pétrole non conventionnel a profondément changé la dynamique des importations américaines, réduisant les besoins en brut étranger et conduisant même à des exportations.

---

<sup>1</sup>Didier Houssin. "Le pétrole dans les relations américano-séoudiennes : enjeux et perspectives". In: (2011). URL: <https://shs.cairn.info/revue-les-cahiers-de-l-orient-2011-4-page-29?lang=fr>

<sup>2</sup>CEPII. "De l'importance de la nature des chocs pétroliers". In: (2010). URL: <https://shs.cairn.info/revue-economique-2010-3-page-511?lang=fr>

<sup>3</sup>Paul Hubert Elizaveta Archanskaïa Jérôme Creel. "L'économie mondiale 2007". In: (2007). URL: [https://www.cepii.fr/PDF\\_PUB/em/2007/em2007-05.pdf](https://www.cepii.fr/PDF_PUB/em/2007/em2007-05.pdf)

<sup>4</sup>"Statistical Review of World Energy – 2021". In: (2021). URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>

<sup>5</sup>Connaissances des énergies. "The Next Revolution". In: (2012). URL: [https://www.connaissancesdesenergies.org/oil-next-revolution-241104?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.connaissancesdesenergies.org/oil-next-revolution-241104?utm_source=chatgpt.com)

---

Les sources d'importation ont également évolué au fil du temps. Historiquement, le Moyen-Orient, et en particulier l'Arabie saoudite, membre fondateur de l'OPEP, a été un fournisseur clé de pétrole pour les États-Unis<sup>6</sup>. Cependant, avec les bouleversements géopolitiques et les changements de politique énergétique, une part croissante des importations provient du Canada, qui est devenu le principal fournisseur de pétrole brut des États-Unis depuis les années 2010. La proximité géographique et les relations commerciales stables avec le Canada ont permis de sécuriser ces importations, tout en réduisant les risques associés aux fluctuations du marché mondial.

Cette évolution des importations pétrolières, marquée par des influences géopolitiques et économiques, pose la question des facteurs sous-jacents qui influencent ces dynamiques. C'est dans cette optique que l'analyse par séries temporelles multivariées s'avère pertinente, car elle permet de saisir les interactions entre différentes variables économiques, notamment entre le prix du gaz naturel, du pétrole, et le taux de change USD/EUR, afin d'identifier les mécanismes qui régissent les fluctuations des importations.

Dans ce contexte, cette étude propose d'analyser les dynamiques de l'importation de pétrole aux USA à l'aide d'un modèle de série temporelle multivariée, intégrant quatre variables explicatives : le prix du gaz naturel, le prix du pétrole, le volume d'importation de pétrole et de produits pétroliers, ainsi que le taux de change USD/EUR. L'objectif est de comprendre les mécanismes d'interaction entre ces variables et d'évaluer leur impact respectif sur les fluctuations des importations, afin de dégager des implications pour la politique économique et les stratégies énergétiques des acteurs concernés.

La problématique centrale de cette étude se résume alors à la question suivante : Quelles sont les interactions et les contributions respectives du prix du gaz naturel, du prix du pétrole, et du taux de change USD/EUR dans les fluctuations des importations de pétrole et produits pétroliers, et comment modéliser efficacement ces dynamiques dans une approche de série temporelle multivariée ?

Ainsi, cette étude se structure autour de trois axes principaux. Dans un premier temps, nous enrichissons la littérature existante en explorant notre base de données, en analysant les variables sélectionnées et en vérifiant les hypothèses. Nous mettrons également en lumière les statistiques descriptives de notre étude, en extrayant des enseignements clés. Dans un second temps, nous procéderons à la sélection du modèle approprié, en nous appuyant sur une analyse approfondie des critères pertinents. Enfin, nous présenterons les résultats empiriques obtenus à partir des méthodes économétriques robustes employées.

---

<sup>6</sup>Laurence Nardon. "Les États-Unis vers l'indépendance énergétique ?" In: (2013). URL: <https://shs.cairn.info/revue-politique-etrangere-2013-2-page-27?lang=fr>

---

## 2 Les données

Les données utilisées dans cette analyse jouent un rôle central dans l’atteinte des objectifs de l’étude. Cette section précise leur provenance, leurs principales caractéristiques et les étapes de leur traitement préalable à la modélisation.

### 2.1 Choix des variables

Notre base de données mensuelle couvre la période du 31 janvier 1999 au 31 décembre 2019, soit un total de 252 observations mensuelles. L’étude repose sur quatre variables: le prix moyen du pétrole, le prix du gaz naturel, le taux de change USD/EUR et le volume des importations de pétrole et de produits pétroliers.

#### 2.1.1 Importations de pétrole et produits pétroliers

Les données utilisées proviennent de la série ”Weekly Petroleum Status Report” disponible sur le site de l’Energy Information Administration (EIA). Cette série fournit des informations hebdomadaires sur la production, les stocks et les importations de pétrole aux États-Unis<sup>7</sup>. Les importations de pétrole brut aux États-Unis jouent un rôle stratégique dans l’équilibre énergétique du pays, bien que la production nationale ait fortement augmenté avec l’essor du pétrole de schiste<sup>8</sup>. Malgré cette autonomie relative, les États-Unis continuent d’importer du brut en raison des spécificités de leurs infrastructures de raffinage, optimisées pour traiter un mélange de pétroles légers et lourds<sup>9</sup>. Ces importations dépendent de plusieurs facteurs, notamment la demande intérieure, les coûts de transport, les prix du pétrole et les dynamiques géopolitiques influençant l’offre des principaux pays producteurs. Par ailleurs, la stabilité du marché pétrolier américain est en partie déterminée par les variations du taux de change du dollar, qui impactent le coût des importations et modulent les décisions stratégiques des raffineries et des entreprises énergétiques. Ainsi, bien que les États-Unis figurent parmi les plus grands producteurs mondiaux de pétrole, ils demeurent un acteur incontournable dans les flux d’importation de pétrole brut, influençant significativement l’équilibre du marché international<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> ”Weekly Petroleum Status Report”. In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/petroleum/supply/weekly/>

<sup>8</sup> ”Today in Energy”. In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/>

<sup>9</sup> ”Les exportations américaines de pétrole brut à un nouveau niveau record”. In: (2024). URL: <https://www.connaissancedesenergies.org/les-exportations-americaines-de-petrole-brut-un-nouveau-niveau-record-241104>

<sup>10</sup> ”Pétrole/USA: hausse des stocks de brut, les importations montent”. In: (2024). URL: <https://www.allnews.ch/content/news/p%C3%A9troleusa-hausse-des-stocks-de-brut-les-importations-montent>

---

### 2.1.2 Prix moyen du pétrole

Les données utilisées proviennent de la série "Crude Oil Prices: West Texas Intermediate (WTI) - Cushing, Oklahoma" sont disponibles sur le site de la Federal Reserve Bank of St. Louis (FRED)<sup>11</sup>. Cette série fournit le prix quotidien du baril de pétrole brut WTI, une référence clé sur le marché pétrolier mondial. Afin d'adapter ces données à notre analyse, nous avons choisi de les transformer en données mensuelles en calculant la moyenne des prix quotidiens pour chaque mois. Cette agrégation permet de réduire la volatilité liée aux variations journalières et d'identifier des tendances de moyen et long terme.<sup>12</sup> Cette variable influence directement les importations de pétrole, car des fluctuations des prix peuvent affecter la rentabilité des importations et la décision des acteurs économiques concernant l'approvisionnement en pétrole.

### 2.1.3 Taux de change USD/EUR

Les données concernant le Taux de change USD/EUR<sup>13</sup> proviennent de la Banque de France. La variable taux de change USD/EUR détermine la valeur du dollar par rapport à l'euro et influence directement le prix du pétrole pour les acheteurs européens. Lorsque le dollar s'apprécie par rapport à l'euro, le pétrole devient plus cher en euros, réduisant ainsi la demande européenne. Cette baisse de la demande exerce une pression à la baisse sur les prix mondiaux du pétrole, car une réduction de la demande d'une grande zone économique comme l'Europe peut affecter les prix globaux, même si l'offre reste inchangée. Ainsi, le taux de change USD/EUR affecte indirectement le prix moyen du pétrole en modifiant les comportements d'achat mondiaux, notamment en Europe. De plus, une appréciation du dollar réduit le coût des importations en termes de monnaie nationale, ce qui peut inciter à une hausse des importations.

### 2.1.4 Prix du gaz naturel

Les données utilisées pour le prix du gaz naturel proviennent de la série "Natural Gas Henry Hub Spot Price" disponible sur le site de l'Energy Information Administration (EIA)<sup>14</sup>. Cette série fournit le prix mensuel du gaz naturel en dollars par million de BTU (British Thermal Units), basé sur les transactions à Henry Hub, un point de référence

---

<sup>11</sup> "Pétrole WTI". in: (2025). URL: <https://www.google.com/url?q=https://www.boursorama.com/bourse/matieres-premieres/cours/8xWBS/&sa=D&source=docs&ust=1738857248946540&usg=AOvVaw2uMm-AZObJwMQacfkCvU5q>

<sup>12</sup> "Effet du prix du pétrole sur l'économie américaine". In: (2020). URL: <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/fd525dbf-5857-4a8a-8f40-70c6eaec60af/files/01c57236-186b-4dce-b011-37c91b0a656e>

<sup>13</sup> "Taux de change USD/EUR". in: (2025). URL: <https://webstat.banque-france.fr/fr/catalogue/exr/EXR.M.USD.EUR.SP00.E>

<sup>14</sup> "Prix du gaz naturel". In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>

---

pour le marché nord-américain du gaz naturel. Ces données, déjà agrégées mensuellement, nous permettent d'observer l'évolution des prix du gaz naturel au fil du temps. Le prix du gaz naturel peut influencer le prix du pétrole, car ces deux énergies sont des substituts dans certains secteurs, comme la production d'électricité ou le chauffage, et sont souvent liés dans les politiques énergétiques mondiales<sup>15</sup>. Les variations des prix du gaz naturel peuvent donc avoir un impact indirect sur la demande et les coûts de production pétrolière, contribuant ainsi à des ajustements des prix du pétrole.

---

<sup>15</sup> “Vers une nouvelle géopolitique du gaz”. In: (2015). URL: <https://shs.cairn.info/revue-geoeconomie-2015-2-page-193?lang=fr>



## 2.2 Graphique des séries

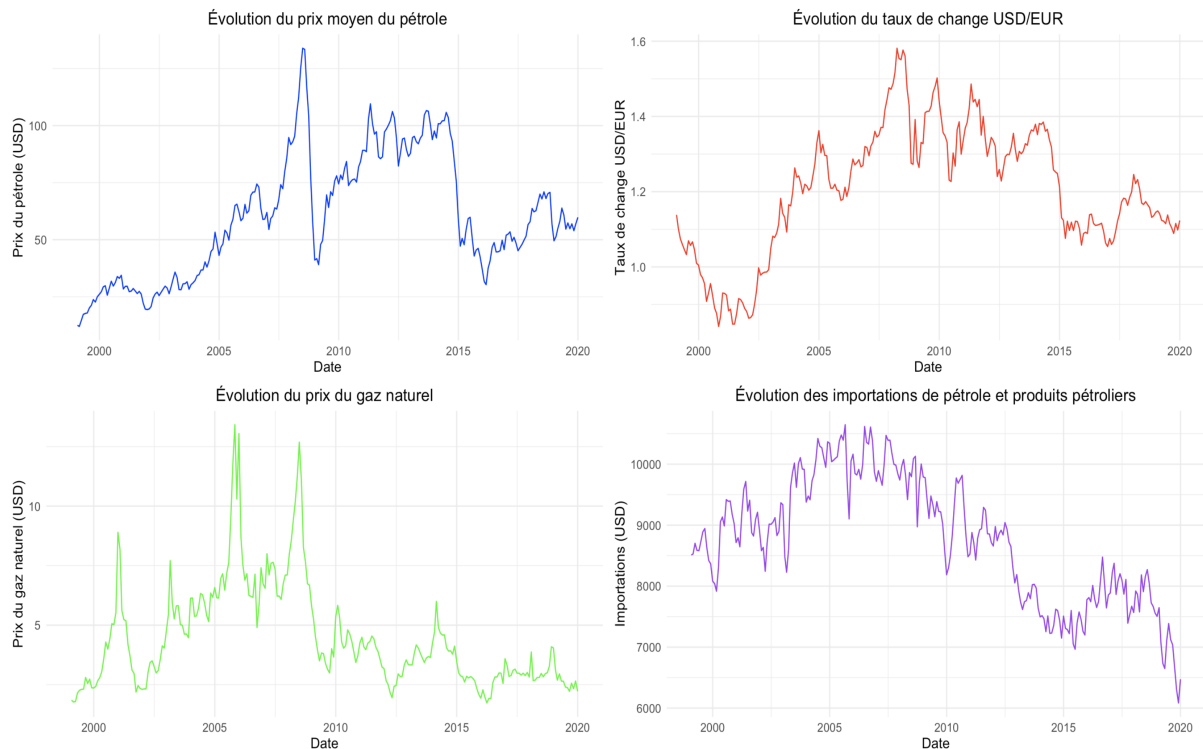


Figure 1: Évolution des séries temporelles au fil du temps.

À première vue, les quatre séries temporelles, observées en *Figure 1*, entre 1999 et fin 2019 montrent des tendances claires, des fluctuations notables et des variations de grande amplitude, ce qui suggère qu'elles ne sont pas stationnaires. Le prix moyen du pétrole affiche une hausse continue jusqu'en 2008, suivie d'une chute pendant la crise financière mondiale, puis d'une reprise avant une nouvelle baisse en 2014-2015, probablement liée à l'essor du pétrole de schiste aux États-Unis et à une offre excédentaire. Une chute marquée en fin 2019, en raison de la crise du COVID-19, est également visible. Le taux de change USD/EUR présente des phases de dépréciation jusqu'en 2001, suivies d'une appréciation jusqu'en 2008, avec une volatilité importante après la crise financière de 2008 et une tendance baissière post-2014, liée aux divergences de politiques monétaires entre la BCE et la FED. Le prix du gaz naturel montre des pics significatifs entre 2000 et 2010, en lien avec des tensions géopolitiques et la demande énergétique, avant une baisse progressive après 2010, influencée par le gaz de schiste et la diversification des sources d'approvisionnement. Enfin, les importations de pétrole et de produits pétroliers montrent une tendance à la hausse jusqu'en 2008, suivie d'une forte volatilité, puis d'une tendance à la baisse après 2014, reflétant une réduction de la dépendance aux importations, notamment grâce à la transition énergétique et à la montée du pétrole de schiste. Ces séries reflètent l'impact des chocs économiques et géopolitiques, nécessitant une possible transformation.

---

## 2.3 Traitement des données

Nous allons commencer par traiter les données en effectuant les transformations nécessaires avant de procéder à leur modélisation.

### 2.3.1 Saisonnalité

Nous débutons l'analyse en étudiant la saisonnalité des séries avec le test Seasonal Dummies et le test combiné WO, via la fonction *combined\_test()* du package *seastests*. Ces tests permettent d'identifier les séries nécessitant un ajustement saisonnier.

	Seasonal dummies	Webell Ollech test	Présence de saisonnalité
Prix moyen du pétrole	0.2756	1, 1, 0.6141	Non
Taux de change	0.5945	1, 1, 0.8072	Non
Prix du gaz	0.1447	1, 1, 0.2999	Non
Importations de pétrole	$2.36 \times 10^{-06}$	0.00054, 0.00053, $3.61 \times 10^{-05}$	Oui

Table 1: Résultats des tests de saisonnalité pour les différentes séries temporelles.

Les résultats des tests de saisonnalité en *Table 1* indiquent que seule la variable Importations de pétrole présente une saisonnalité significative, avec des p-values très faibles, suggérant une forte influence saisonnière. En revanche, les séries du prix moyen du pétrole, du taux de change et du prix du gaz ne montrent pas de saisonnalité, leurs p-values étant largement supérieures à 0,05, indiquant l'absence d'effets saisonniers marqués.

### 2.3.2 Désaisonnalisation

Afin de pallier l'absence de saisonnalité, nous avons désaisonnalisé la série Importations de pétrole et de produits pétroliers en utilisant la méthode X13-ARIMA-SEATS, via la fonction R *x13()* du package *seasonal*. Cette méthode a ajusté les séries pour éliminer les effets saisonniers et garantit ainsi des données plus adaptées pour la modélisation .

	Seasonal dummies	Webell Ollech test	Présence de saisonnalité
Importations de pétrole	0.9693	1 1 0.9576	Non

Table 2: Résultats des tests de saisonnalité pour la série Importations de pétrole.

Nous avons réexaminé les tests de saisonnalité afin de confirmer l'absence d'effets saisonniers. Comme l'illustre la *Table 2* ci-dessus, les résultats des tests indiquent une p-value bien supérieure au seuil de 0.05, confirmant que la série des importations de pétrole ne présente plus de saisonnalité significative. Ces résultats valident l'ajustement de la série et nous permettent de l'utiliser pour une modélisation plus précise et fiable.

### 2.3.3 Outliers

Nous avons ensuite examiné les valeurs aberrantes pour chaque série temporelle à l'aide de la fonction *tso()* du package *tsoutliers*. Les résultats, détaillés en annexes A.2, ont révélé plusieurs valeurs aberrantes, telles que l'indice 118 pour la série des importations de pétrole (octobre 2008) et les indices 50 et 60 pour la série du prix du gaz mensuel (février 2003 et décembre 2003), parmi d'autres. Ces valeurs aberrantes peuvent être attribuées à des événements exceptionnels tels que la crise financière des subprimes en 2008, ainsi que les ouragans Katrina et Rita en 2005, qui ont eu un impact significatif.

Dans le cadre de notre analyse, nous avons décidé de conserver ces valeurs aberrantes. Bien que ces observations soient extrêmes, elles reflètent des chocs économiques et environnementaux importants, qui doivent être pris en compte pour garantir la précision du modèle. Selon le modèle choisi, qu'il s'agisse d'un VECM ou d'un VAR, cette approche permettra de mieux capturer les dynamiques sous-jacentes à court terme et à long terme.

### 2.3.4 Stationnarité

Avant d'estimer un VECM, il est crucial de vérifier la stationnarité des séries. Nous avons utilisé le test ADF avec la fonction *adfTest()* du package *tseries* et le test KPSS via la fonction *kpss.test()* du package *urca*. Ces tests permettent de déterminer si une différenciation est nécessaire pour atteindre la stationnarité, condition préalable à l'estimation.

	Test	Paramètre	Statistique	p-value	Conclusion
<b>Prix moyen du pétrole</b>	ADF	Lag Order: 1	-0.7149	0.3885	Non stationnaire
	KPSS	Level = 1.6397	1.6397	0.01	Non stationnaire
<b>Taux de change USD/EUR</b>	ADF	Lag Order: 0	-0.251	0.5363	Non stationnaire
	KPSS	Level = 1.1641	1.1641	0.01	Non stationnaire
<b>Prix du gaz naturel</b>	ADF	Lag Order: 9	-0.8204	0.3549	Non stationnaire
	KPSS	Level = 1.0724	1.0724	0.01	Non stationnaire
<b>Importations de pétrole</b>	ADF	Lag Order: 2	-0.9244	0.3217	Non stationnaire
	KPSS	Level = 2.6194	2.6194	0.01	Non stationnaire

Table 3: Résultats des tests ADF et KPSS sur les séries brutes.

Les résultats de la *Table 3* montrent que les séries du prix du pétrole, du taux de change, du gaz et des importations de pétrole ne sont pas stationnaires, ce qui est corroboré par les corrélogrammes, qui révèlent des autocorrélations indiquant une intégration d'ordre 1. Ces résultats sont déterminants pour l'analyse VECM, qui repose sur des séries non stationnaires mais cointégrées. En l'absence de cointégration, un modèle VAR serait envisagé. Dans les deux cas, une différenciation préalable est nécessaire.

### 2.3.5 Différenciation

Il est donc impératif de différencier les séries non stationnaires afin d'adapter leurs propriétés aux exigences des modèles économétriques, ce qui permet d'assurer la fiabilité des résultats et de mener une analyse précise des relations dynamiques entre les variables.

	Test	Paramètre	Statistique	p-value	Conclusion
<b>Prix moyen du pétrole</b>	ADF	Lag Order: 10	-4.8026	0.01	Stationnaire
	KPSS	Level = 0.21961	0.21961	0.1	Stationnaire
<b>Taux de change USD/EUR</b>	ADF	Lag Order: 9	-4.6831	0.01	Stationnaire
	KPSS	Level = 0.11213	0.11213	0.1	Stationnaire
<b>Prix du gaz naturel</b>	ADF	Lag Order: 10	-5.199	0.01	Stationnaire
	KPSS	Level = 0.14869	0.14869	0.1	Stationnaire
<b>Importations de pétrole</b>	ADF	Lag Order: 10	-4.2741	0.01	Stationnaire
	KPSS	Level = 0.19979	0.19979	0.1	Stationnaire

Table 4: Résultats des tests ADF et KPSS sur les séries différenciées.

Après avoir appliqué une différenciation d'ordre 1, toutes les séries temporelles sont désormais stationnaires. Les résultats des tests ADF et KPSS confirment cette stationnarité, et cette propriété est également visible graphiquement, avec la disparition des autocorrélations. Cela valide l'hypothèse de stationnarité, nous permet ainsi de poursuivre avec des analyses complémentaires, telles que le test de co-intégration de Johansen, pour examiner les relations à long terme entre les variables de notre ensemble de données.

## 2.4 Statistiques descriptives

La série ayant été traitée, nous pouvons désormais procéder à des statistiques descriptives sur notre jeu de données brut, afin d'analyser ses principales caractéristiques.

	Prix du pétrole	Taux de change	Prix du gaz	Importations de pétrole
<b>Minimum</b>	12.01	0.84	1.73	6085
<b>1er quartile</b>	35.54	1.10	2.85	7892
<b>Médiane</b>	57.18	1.21	3.88	8826
<b>Moyenne</b>	59.73	1.20	4.46	8758
<b>3e quartile</b>	80.24	1.33	5.74	9717
<b>Maximum</b>	133.88	1.58	13.42	10646
<b>Écart type</b>	27.09	0.17	2.18	1003.22

Table 5: Statistiques descriptives des séries temporelles brutes.

Les statistiques descriptives des séries temporelles présentées en *Table 5* révèlent plusieurs caractéristiques intéressantes. Le prix du pétrole affiche une forte volatilité, avec une

moyenne de 59,73 et des variations allant de 12,01 à 133,88, accompagné d'un écart-type de 27,09, ce qui reflète des chocs économiques marqués affectant les prix mondiaux. Le taux de change, quant à lui, évolue autour d'une moyenne de 1,20, avec des variations plus modérées entre 0,84 et 1,58, et un écart-type de 0,17, suggérant une relative stabilité des devises sur la période étudiée. Le prix du gaz présente une asymétrie notable, avec une moyenne de 4,46, un maximum de 13,42, et un écart-type de 2,18, ce qui pourrait indiquer des périodes de tensions sur le marché énergétique. Enfin, les importations de pétrole, centrées autour de 8758, montrent une distribution équilibrée avec un écart-type de 1003,22, ce qui traduit une certaine stabilité des volumes échangés.

Ces éléments montrent des distributions variées, allant de la stabilité des importations de pétrole et du taux de change, à la volatilité accrue du prix du pétrole et à l'asymétrie marquée du prix du gaz. Il serait donc pertinent d'examiner les tests de Skewness et de Kurtosis pour évaluer la normalité de ces distributions.

	Kurtosis	Skewness
<b>Prix du pétrole</b>	-0.744	0.361
<b>Taux de change</b>	-0.513	-0.180
<b>Prix du gaz</b>	2.606	1.489
<b>Importations de pétrole</b>	-0.895	-0.146

Table 6: Asymétrie et aplatissement des séries brutes.

L'analyse des coefficients de skewness et de kurtosis permet de mieux comprendre la nature des distributions des séries temporelles étudiées. D'après la *Table 6*, le prix du pétrole et les importations de pétrole et de produits pétroliers présentent des valeurs négatives de kurtosis (-0.744 et -0.895) suggérant des distributions relativement aplaties, avec des queues moins prononcées que celles d'une distribution normale. La skewness proche de zéro pour ces mêmes variables, respectivement 0.361 et -0.146, indique une distribution symétrique, sans asymétrie significative. En revanche, le prix du gaz présente une forte asymétrie positive (1.489) et une kurtosis élevée (2.606), ce qui reflète une distribution marquée par des valeurs extrêmes, possiblement dues à des événements exceptionnels comme des crises géopolitiques ou des perturbations de l'offre. Quant au taux de change, il affiche une légère asymétrie négative (-0.180) et une kurtosis négative de -0.513, indiquant une distribution plus régulière et une stabilité relative des taux de change.

---

## 3 Modèle retenu

Nous allons à présent aborder le choix du modèle économétrique retenu, basé sur les résultats des tests de stationnarité, de co-intégration et les caractéristiques des séries.

### 3.1 Choix du modèle

#### 3.1.1 Choix du nombre de retards

Avant de tester la présence de relation de co-intégration, il est crucial de déterminer le nombre optimal de retards à inclure dans notre modèle. Pour cela, nous utilisons des critères d'information tels que l'AIC, le HQ, le SC et le FPE via la fonction *VARselect()*.

	AIC(n)	HQ(n)	SC(n)	FPE(n)
Retard	5	2	1	5

Table 7: Choix du nombre de retard.

Les résultats montrent les valeurs des différents critères de sélection pour chaque nombre de retards allant de 1 à 12. Les critères de sélection indiquent que l'AIC et le FPE privilégient 5 retards, le SC choisit 1, et le HQ opte pour 2. En favorisant l'AIC et en tenant compte de la robustesse de ce critère, nous retenons donc 5 retards pour l'analyse.

#### 3.1.2 Test de cointegration

Il convient à présent de réaliser un test de co-intégration sur les séries non stationnaires en niveau afin de vérifier s'il existe une relation stable à long terme entre les séries.

Rang	Statistique	10%	5%	1%
$r \leq 3$	5.27	10.49	12.25	16.26
$r \leq 2$	19.94	22.76	25.32	30.45
$r \leq 1$	40.60	39.06	42.44	48.45
$r = 0$	75.66	59.14	62.99	70.05

Table 8: Résultats du test de cointégration de Johansen.

D'après la *Table 8*, Le test de co-intégration de Johansen, basé sur la statistique de trace avec une tendance linéaire, rejette l'hypothèse  $r = 0$  à 1%, confirmant une relation de co-intégration. Cependant, l'hypothèse  $r \leq 1$  est significative à 10%, ce qui justifie de retenir une seule relation de co-intégration pour simplifier l'analyse et l'estimation. Les variables partagent une dynamique à long terme, justifiant l'utilisation d'un modèle VECM.

---

## 3.2 Présentation théorique des modèles

Il convient de présenter les concepts théoriques des modèles utilisés dans notre analyse, en expliquant les principes sous-jacents et les méthodologies appliquées.

### 3.2.1 Vector Autoregression (VAR)

Les modèles VAR (Vector Autoregression) modélisent simultanément plusieurs variables endogènes. Un modèle VAR( $p$ ) peut être exprimé comme suit :

$$Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + u_t$$

où  $A_i$  sont des matrices de coefficients  $K \times K$  et  $u_t$  un vecteur de résidus suivant un bruit blanc. La stabilité du modèle impose que les valeurs propres des matrices  $A_i$  soient inférieures à l'unité.

Le choix du nombre de retards  $p$  repose sur des critères d'information. La validité du modèle exige des résidus non autocorrélés, normalement distribués et homoscédastiques.

Les modèles VAR sont couramment utilisés pour la prévision et l'analyse structurelle, notamment pour examiner la causalité au sens de Granger. Les fonctions d'impulsion permettent de mesurer la réaction d'une variable à un choc exogène, bien que l'orthogonalisation par décomposition de Cholesky soit souvent requise pour isoler ces effets. Malgré leur flexibilité, ces modèles restent des outils purement statistiques, nécessitant une spécification rigoureuse des variables afin d'éviter les biais.

### 3.2.2 Structural Vector Error Correction Model (VECM)

Le modèle à correction d'erreur vectorielle (VECM), extension du VAR, s'applique aux séries non stationnaires mais cointégrées. Il capture la dynamique de court terme tout en préservant l'équilibre à long terme, en éliminant les tendances stochastiques communes. Le nombre de relations de cointégration, déterminé par des tests comme celui de la trace, permet d'analyser les relations de long terme et d'obtenir des prévisions fiables.

De plus, le VECM permet de mieux comprendre les ajustements à court terme entre les variables. Lorsqu'une série s'écarte de son équilibre de long terme, le modèle capture la vitesse à laquelle les variables reviennent à cet équilibre. Ainsi, il offre non seulement une vision des relations structurelles à long terme, mais aussi une analyse dynamique des ajustements qui se produisent dans le court terme. Cette dualité entre court et long terme est ce qui rend le VECM particulièrement adapté aux séries économiques complexes.

---

## 4 Résultats empiriques

### 4.1 Ordre des variables

Dans le cadre d'un VECM, l'ordre des variables est crucial, allant de la plus exogène à la plus endogène pour une interprétation cohérente des relations. Selon la littérature, le prix du pétrole est considéré comme la variable la plus exogène, influençant directement le taux de change et le prix du gaz naturel. Cela repose sur le fait que les variations des prix du pétrole se répercutent rapidement sur les marchés financiers et énergétiques. Le taux de change ajuste la compétitivité des exportations et des importations en réponse aux fluctuations du pétrole. Les importations de pétrole, plus endogènes, dépendent des décisions économiques influencées par la conjoncture, les prix et la demande intérieure.

Ordre	Variable
1	Prix du pétrole
2	Taux de change
3	Prix du gaz naturel
4	Importations de pétrole

Table 9: Ordre des variables dans le modèle VECM.

### 4.2 VECM : Choix du modèle optimal

Pour déterminer le modèle le plus adapté, nous avons utilisé la fonction *VECM()*, qui permet d'ajuster différents types de modèles en intégrant des éléments constants ou de tendance. Nous avons exploré plusieurs spécifications de modèles en ajustant les paramètres. Chaque modèle a été évalué à l'aide des critères AIC et BIC, qui nous permettent de sélectionner le modèle offrant le meilleur compromis entre la qualité de l'ajustement et la simplicité. Après comparaison des résultats, il est apparu que le modèle intégrant une *tendance* est le plus optimal. Ce modèle, qui s'ajuste de manière optimale aux données tout en restant suffisamment simple, a donc été retenu pour l'estimation du VECM.

#### 4.2.1 Vérification des hypothèses

Les tests diagnostiques sur les modèles montrent que l'autocorrélation des résidus diminue avec l'augmentation du nombre de retards et devient non significative pour  $p=5$ , validant ainsi ce choix pour l'analyse. Le test de normalité de Jarque-Bera indique une non-normalité des résidus, principalement due à une forte kurtosis, sans impact majeur sur la validité des estimations. Enfin, les tests ARCH indiquent l'absence d'hétéroscédasticité significative pour  $p=5$ , suggérant une variance stable des erreurs.



### 4.2.2 Matrices des coefficients de cointégration $\alpha$ et $\beta$

	Prix_pétrole.l5	Taux_change.l5	Prix_gaz_naturel.l5	Imp_petrole.l5	Trend.l5
Prix_pétrole.l5	1.00000000	1.00000000	1.00000000	1.00000000	1.00000000
Taux_change.l5	-133.56784353	-209.90169329	37.316223409	-167.67073678	71.43133277
Prix_gaz_naturel.l5	22.36375025	-4.17319695	-9.642188550	-3.64950433	-4.12109072
Imp_petrole.l5	-0.04038908	0.03405685	-0.007241687	-0.01109535	0.03407348
Trend.l5	-0.14607185	0.29914368	-0.219292920	-0.42050802	-0.54305653

Table 10: Matrice Beta des relations de cointégration.

La matrice  $\beta$  représente les relations à long terme entre les variables dans un modèle de cointégration, capturant ainsi les interactions stables et persistantes entre elles. Dans notre cas, les coefficients de  $\beta$  montrent une forte relation entre les variables, avec des coefficients proches de 1 sur la diagonale, indiquant une relation de cointégration parfaite entre chaque variable et elle-même, ce qui est effectivement attendu dans un modèle de cointégration. Par exemple, le coefficient de -133.57 entre le taux de change et le prix du pétrole suggère une influence négative à long terme du taux de change sur le prix du pétrole. D'autres coefficients, tels que celui de 22.36 entre le prix du gaz naturel et le prix du pétrole, montrent une relation positive à long terme, ce qui indique que les variations du prix du gaz naturel ont un effet significatif sur le prix du pétrole à long terme.

	Prix_pétrole.l5	Taux_change.l5	Prix_gaz_naturel.l5	Imp_petrole.l5
$\alpha$	-0.0346543616	-0.0001033715	-0.0063912808	0.2484255942

Table 11: Matrice des coefficients  $\alpha$ .

La matrice  $\alpha$  décrit les ajustements à court terme vers l'équilibre à long terme après un choc ou un déséquilibre entre les variables. Les coefficients de cette matrice mesurent la rapidité avec laquelle les variables reviennent à leur équilibre de cointégration. Par exemple, le coefficient de -1.92 pour le prix du pétrole indique que toute déviation temporaire du prix du pétrole par rapport à l'équilibre à long terme sera rapidement corrigée, avec un ajustement relativement fort. Le coefficient de 3.02 pour le taux de change dans l'équation du prix du pétrole montre que les variations du taux de change ont un impact immédiat et relativement fort sur le prix du pétrole à court terme. En revanche, d'autres variables comme le prix du gaz naturel et les importations de pétrole et produits pétroliers présentent des ajustements plus modérés et plus lents. Cela suggère que les variables liées à l'énergie, à savoir, le gaz naturel et l'impact du pétrole, réagissent moins rapidement aux déséquilibres à court terme.

---

### 4.2.3 Test de restrictions imposées

Un test d'exogénéité a été effectué dans cette analyse afin de déterminer si certaines variables, comme le taux de change et le prix du pétrole, pouvaient être traitées comme exogènes, c'est-à-dire influençant d'autres variables sans être influencées par elles. Ce test est crucial dans le cadre du modèle VECM, car il permet d'éviter les biais liés aux rétroactions endogènes entre les variables. Une restriction a été spécifiquement posée sur la relation entre le taux de change et le prix du pétrole, sous l'hypothèse d'une relation de cointégration à long terme entre ces deux variables. Cette restriction suppose que le taux de change et le prix du pétrole suivent une dynamique interconnectée, ce qui est souvent observé dans la littérature économique. En effet, le prix du pétrole et le taux de change peuvent être liés négativement à long terme, notamment dans les pays producteurs de pétrole, où une appréciation du taux de change peut rendre les exportations de pétrole plus chères et réduire la demande extérieure, ce qui conduit à une baisse des prix.

Les matrices  $\alpha$  et  $\beta$  sont définies comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Les résultats de la procédure de Johansen, avec la restriction imposée entre le taux de change et le prix du pétrole, confirment la validité de cette relation. La p-value de 0.15, supérieure à 0.05, indique que la relation imposée est acceptée, ce qui montre que la dynamique négative entre ces deux variables dans le modèle de cointégration est robuste. Les valeurs propres suggèrent des relations de long terme stables, tandis que les poids associés aux variables montrent l'impact de cette restriction sur les ajustements à court terme. Cette dynamique cohérente entre le taux de change et le prix du pétrole reflète l'équilibre de cointégration, assurant une stabilité des relations à long terme.

Dans le cadre du modèle VECM, la restriction imposée permet de garantir une spécification du modèle qui reflète correctement les interrelations entre les variables économiques étudiées. Elle assure que la relation entre le taux de change USD/EUR et le prix du pétrole suit une dynamique stable et cohérente à la fois à court et à long terme, ce qui améliore la validité de notre modèle, notamment dans le cadre de prévisions économiques.

### 4.3 SVECM : Restrictions de court et long terme

Par la suite, un modèle SVECM a été estimé afin d'intégrer des restrictions structurelles et d'affiner l'analyse des interactions entre les variables. Dans un premier temps, nous avons déterminé les restrictions à poser dans les matrices  $SR$  et  $LR$ . En effet, la procédure SVECM nécessite de telles restrictions pour identifier correctement les relations de cointégration et les chocs sous-jacents. Avec quatre variables ( $k = 4$ ) et une seule relation de cointégration ( $r = 1$ ), il est nécessaire d'imposer des restrictions sur les matrices de court terme ( $SR$ ) et de long terme ( $LR$ ) afin d'identifier correctement les chocs structurels. Selon la théorie, le nombre de restrictions à imposer sur la matrice  $LR$  est donné par la formule suivante :

$$(k - r) \times r = (4 - 1) \times 1 = 3$$

Ainsi, trois restrictions doivent être imposées sur la matrice de long terme. Pour la matrice de court terme ( $SR$ ), la décomposition de Cholesky permet d'identifier  $\frac{k(k+1)}{2}$  paramètres, soit 10 dans notre cas. La matrice  $SR$  comportant initialement  $4 \times 4 = 16$  paramètres, le nombre de restrictions nécessaires est de 6 ( $16 - 10$ ). Toutefois, puisque trois restrictions sont déjà posées sur  $LR$ , il reste à en imposer 3 autres sur  $SR$ .

Toutefois, notre modèle SVECM s'est révélé très sensible aux restrictions de la matrice  $SR$ . Une contrainte excessive l'a rendu trop rigide, entraînant une singularité des calculs et empêchant un ajustement correct des variables à court terme.

Pour résoudre ce problème, nous avons choisi d'imposer une seule restriction dans la matrice  $SR$  : le prix du gaz naturel n'affecte pas immédiatement les importations de pétrole à court terme. Cette restriction se justifie par la faible réactivité immédiate des importations de pétrole et produits pétroliers aux fluctuations du prix du gaz naturel. Bien que ces deux marchés soient liés, leur substituabilité reste limitée à court terme en raison des infrastructures spécifiques et des contrats d'importation rigides. De plus, les variations du prix du gaz sont souvent influencées par des chocs spécifiques, qui n'affectent pas directement les décisions d'importation de pétrole. Ainsi, cette restriction reflète la réalité économique et empirique, où le prix du gaz naturel n'a pas d'effet immédiat et significatif sur les importations de pétrole et produits pétroliers.

	Prix du pétrole	Taux de change	Gaz mensuel	Importations de pétrole
Prix du pétrole	0.6607885	-1.52547956	1.87079970	1.08450917
Taux de change	1.2925218	0.05419092	0.01617443	-0.01657011
Gaz mensuel	0.6767599	0.59850520	0.45202057	0.00000000
Importations de pétrole	0.3490911	35.14483882	-71.60336356	101.01427395

Table 12: Matrice SR des restrictions sur les coefficients de court terme.

La matrice présentée dans la *Table 12* correspond à une analyse des restrictions sur les coefficients de court terme dans le cadre d'un modèle à vecteurs autorégressifs à correction d'erreurs structurel. Les coefficients de cette matrice représentent les impacts directs et croisés entre ces variables dans le court terme. Par exemple, le coefficient 0.6607885 pour la relation entre le prix du pétrole et lui-même indique une forte corrélation positive, tandis que des valeurs négatives comme -1.52547956 pour la relation entre le prix du pétrole et le taux de change indiquent des relations inverses. Ces résultats sont importants pour identifier comment des chocs ou des changements dans une variable, comme le prix du pétrole, influencent les autres variables économiques dans le modèle.

	Prix du pétrole	Taux de change	Gaz mensuel	Importations de pétrole
Prix du pétrole	95.1194854	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Taux de change	0.7254402	0.01621619	0.00000000	0.00000000
Gaz mensuel	3.9939940	0.35617429	0	0.00000000
Importations de pétrole	2167.5336894	143.58909098	0	0

Table 13: Matrice LR des restrictions sur les coefficients de long terme.

La matrice des restrictions de long terme (LR) présente en *Table 13* impose que certaines variables n'ont pas d'effet permanent sur d'autres, ce qui se reflète dans les résultats obtenus. Nous observons une distinction importante entre les coefficients ayant une valeur de 0.00000000, correspondant aux restrictions explicitement imposées, et ceux affichant simplement 0, bien que nous n'ayons pas posé de contrainte à ces endroits. La présence de 0.00000000 indique que le modèle a bien respecté nos hypothèses en contraignant ces coefficients à être exactement nuls, empêchant ainsi toute transmission d'effet à long terme entre les variables concernées.

En revanche, les 0 apparaissant là où aucune restriction n'a été imposée suggèrent que, même sans contrainte explicite, l'estimation du modèle a conduit à des coefficients naturellement faibles ou nuls. Cela peut refléter une absence réelle de relation économique à long terme ou être une conséquence des spécifications du modèle. Par exemple, la première ligne montre que le prix du pétrole n'influence pas directement les autres variables à long terme, tandis que le taux de change et le gaz mensuel n'ont pas d'impact durable sur les importations de pétrole, conformément aux restrictions. Les valeurs significatives observées dans les premières colonnes suggèrent en revanche des relations persistantes, notamment l'influence du prix du pétrole et du taux de change sur les importations.

Ainsi, la présence de ces zéros là où aucune restriction explicite n'a été imposée soulève une question méthodologique importante, car ils peuvent indiquer une absence réelle de relation économique ou être le résultat des spécifications du modèle.

### 4.3.1 Fonction d'Impulsion

Nous avons estimé des fonctions d'impulsion-réponse (IRF) afin d'analyser l'impact d'un choc sur une variable et son effet sur les autres variables du modèle.

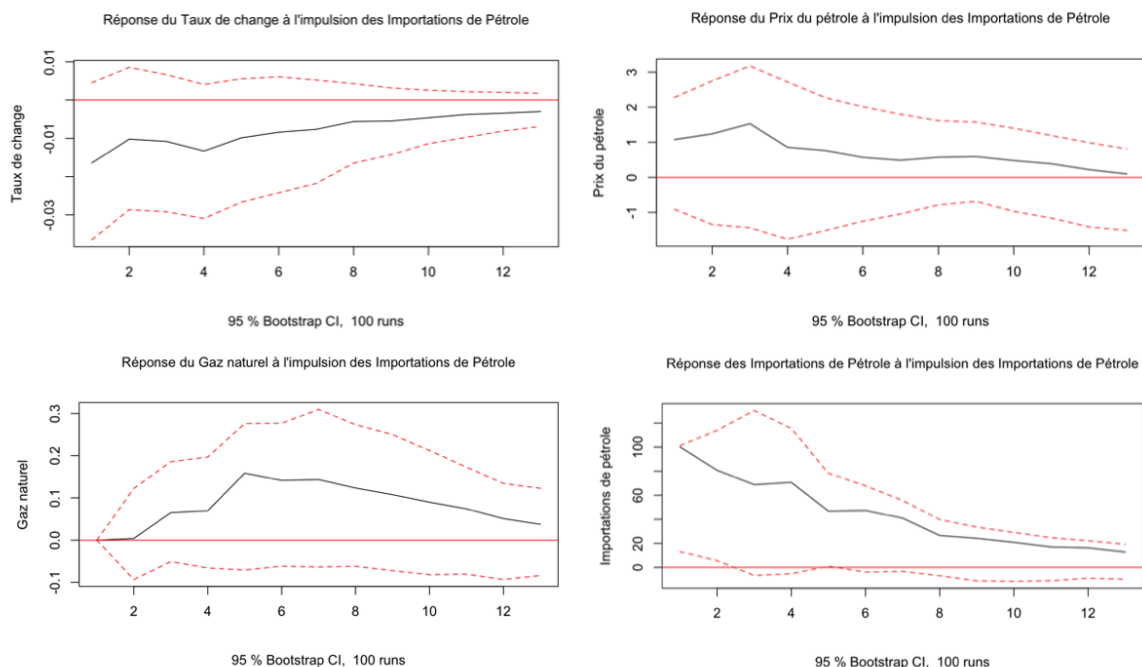


Figure 2: Graphique des fonctions d'impulsion.

Les graphiques de la *Figure 2* représentant les fonctions offrent une vue d'ensemble de l'évolution de chaque variable du modèle au fil du temps, suite à un choc standardisé sur la restriction des importations de pétrole. Lorsque l'intervalle de confiance, ici à 5%, englobe la valeur 0, cela signifie que l'effet du choc n'est pas significatif. Dans notre analyse, aucune des fonctions de réponse ne montre de choc significatif, ce qui suggère l'absence de relation de court terme significative entre les variables du modèle VECM.

Bien que les fonctions de réponse aux impulsions ne révèlent pas d'effets significatifs, certaines tendances peuvent être observées. Suite à un choc sur les importations de pétrole, le taux de change semble réagir négativement avant de se stabiliser rapidement. Le prix du pétrole affiche une légère hausse initiale avant de revenir à son niveau précédent, tandis que le prix du gaz naturel demeure relativement stable, avec une faible augmentation suivie d'un ajustement. Les importations de pétrole, quant à elles, montrent une réaction marquée avant un retour progressif à l'équilibre. Ces dynamiques suggèrent une possible réponse transitoire des variables aux chocs, bien que l'absence de significativité statistique implique que ces effets doivent être interprétés avec prudence.

### 4.3.2 Décomposition de la variance des erreurs de prévisions

Enfin, nous avons effectué une décomposition de la variance pour examiner la contribution relative de chaque variable à la variance des prévisions d'une variable donnée.

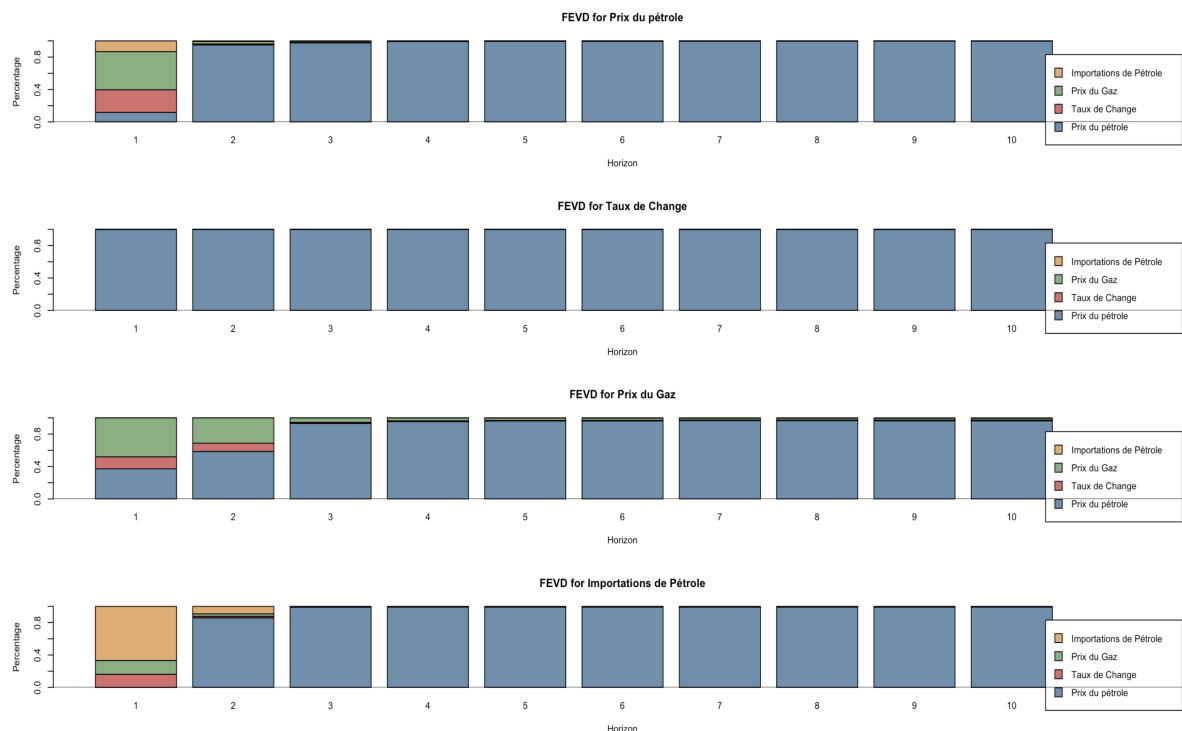


Figure 3: Graphique de la décomposition de la variance des erreurs de prévision.

La *Figure 3* des décompositions de la variance illustre la contribution des chocs sur chaque variable du système à la variance des prévisions sur un horizon donné. Les abscisses représentent les horizons de temps pour les prévisions, allant de 1 à 10 et l'axe vertical le pourcentage de la variance des prévisions expliqué par les chocs sur chacune.

À horizon court, la variance du prix du pétrole est majoritairement expliquée par le prix du gaz, suivi du taux de change. Cependant, à mesure que l'horizon s'allonge, le prix du pétrole devient la principale source de variance, indiquant une dynamique autocorrélée. Concernant le FEVD du taux de change, la variance est d'abord dominée par le prix du pétrole à très court terme, avant qu'une part significative ne soit progressivement attribuée au prix du gaz et au taux de change lui-même. À moyen terme, l'influence du prix du gaz diminue tandis que celle du taux de change augmente de façon continue. Quant aux importations de pétrole, leur variance est principalement expliquée par elles-mêmes à court terme, suivies du prix du gaz et du taux de change. À moyen terme, cette contribution diminue, bien que les importations conservent une légère influence. À long terme, la variance est quasi exclusivement expliquée par le prix du pétrole.

---

## 5 Conclusion

Cette étude a permis d'examiner les dynamiques sous-jacentes aux interactions entre le prix du pétrole, le taux de change USD/EUR, le prix du gaz naturel et les importations de pétrole aux États-Unis. L'approche basée sur un modèle VECM a confirmé l'existence d'une relation de cointégration entre le prix du pétrole et le taux de change USD/EUR, soulignant ainsi l'interdépendance des marchés énergétiques et des fluctuations macroéconomiques. Cette relation de long terme met en évidence la nécessité de considérer ces variables dans une approche intégrée pour mieux comprendre les mécanismes d'ajustement du marché de l'énergie. L'estimation d'un modèle SVECM a ensuite permis d'examiner plus finement ces interactions en imposant des restrictions structurelles, bien que la sensibilité du modèle à ces contraintes ait nécessité une attention particulière pour éviter des problèmes de singularité.

En outre, les analyses des fonctions d'impulsion et de la décomposition de la variance des erreurs n'ont pas mis en évidence d'effets significatifs à court terme, suggérant que les ajustements entre ces variables se font sur des horizons plus longs et sont potentiellement influencés par d'autres facteurs exogènes non pris en compte dans le modèle. Ces résultats soulignent l'importance d'estimer le modèle avec d'autres éléments externes tels que les politiques énergétiques, les tensions géopolitiques ou encore les cycles économiques globaux, qui pourraient jouer un rôle déterminant dans la dynamique des importations.

Ainsi, cette étude contribue à une meilleure compréhension des mécanismes d'ajustement du marché de l'énergie et des facteurs affectant les importations de pétrole aux États-Unis.

---

## 6 Discussion

Les résultats de notre étude ouvrent plusieurs pistes de réflexion. En effet, l'absence d'effets immédiats dans l'analyse des impulsions-réponses suggère que les ajustements des importations de pétrole aux variations des prix énergétiques et du taux de change se font progressivement. Cette inertie pourrait être liée à des facteurs structurels, comme la rigidité des contrats d'importation, les décisions stratégiques des raffineries ou les mécanismes d'absorption des chocs par les stocks.

Le modèle VECM a révélé une relation de co-intégration entre les variables, confirmant l'existence d'un équilibre à long terme. Toutefois, cette approche suppose que les relations demeurent stables durant toute la période étudiée, alors que les marchés pétroliers sont soumis à des évolutions majeures, telles que des avancées technologiques, des régulations nouvelles ou des chocs géopolitiques. Une analyse par fenêtre glissante ou des tests de rupture structurelle pourraient évaluer la robustesse de ces relations dans le temps.

Bien que l'étude se soit concentrée sur un nombre restreint de variables, il serait pertinent d'examiner l'impact d'autres facteurs macroéconomiques, comme la croissance industrielle ou les niveaux de stocks stratégiques. Une approche en modèle factoriel ou en VECM avec contraintes exogènes pourrait intégrer ces éléments tout en préservant une cohérence.

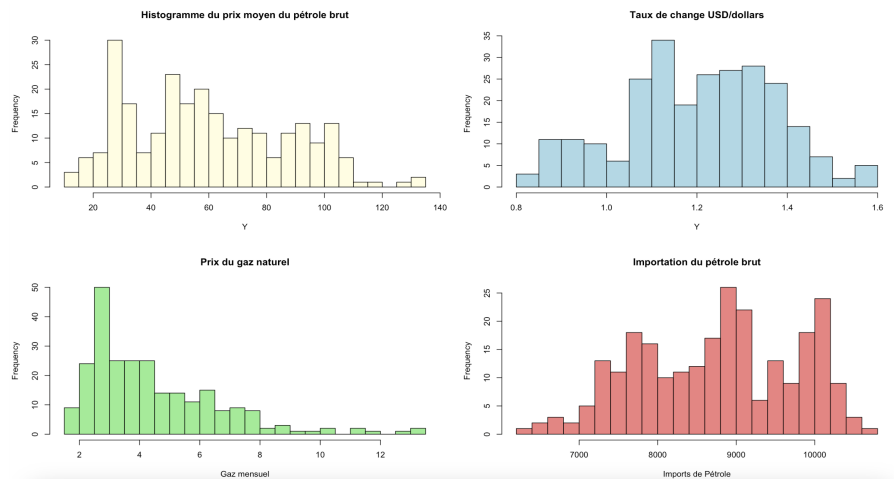
Enfin, la spécification restreinte du modèle a permis de tester certaines hypothèses sur les interdépendances entre les variables. Les résultats confirment l'influence des fluctuations du taux de change et des prix de l'énergie sur les importations de pétrole, mais suggèrent des pistes d'amélioration pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents. Une extension de l'étude pourrait consister à tester différentes hiérarchies de variables ou à comparer les résultats avec d'autres méthodes, comme les modèles non linéaires à correction d'erreur (NARDL), qui captent mieux les asymétries des ajustements.

Dans l'ensemble, cette étude souligne l'importance d'une approche économétrique adaptée pour analyser les dynamiques des importations pétrolières et les limites des modèles linéaires face à des marchés incertains et à ajustements graduels. L'exploration de modèles intégrant des changements de régime ou des structures dynamiques flexibles pourrait améliorer les prévisions et l'interprétation des interactions économiques.

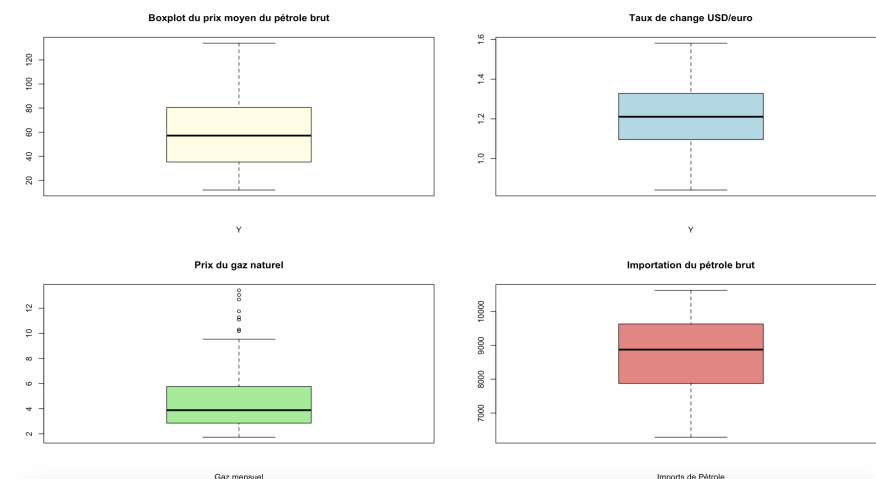


## 7 Annexes

### 7.1 Visualisation des données



Annexe 4: Histogramme des séries temporelles.



Annexe 5: Boxplot des séries temporelles.

### 7.2 Analyse des valeurs aberrantes

Type	Ind	Time	Coefhat	Tstat
LS	118	2008:10	-18.4	-3.834

Annexe 14: Détection des points atypiques pour la série Prix du pétrole

En octobre 2008, la crise financière des subprimes a provoqué un effondrement de la demande mondiale, entraînant une chute brutale des prix du pétrole.

---

Type	Ind	Time	Coefhat	Tstat
TC	118	2008:10	-0.1433	-4.675

---

Annexe 15: Détection des points atypiques pour la série Taux de change

La crise de 2008 a entraîné une forte volatilité des marchés financiers, impactant les taux de change. Cet outlier traduit une dépréciation brutale, probablement due à un afflux de capitaux vers des valeurs refuges comme le dollar.

Type	Ind	Time	Coefhat	T-Stat
TC	24	2000:12	3.357	8.185
LS	26	2001:02	-1.815	-4.118
AO	50	2003:02	2.031	6.578
LS	60	2003:12	1.655	3.860
LS	80	2005:08	1.861	4.326
TC	81	2005:09	2.498	6.193
AO	82	2005:10	2.509	8.110
AO	84	2005:12	3.611	11.690
AO	95	2006:11	1.121	3.631
AO	98	2007:02	1.171	3.792
TC	114	2008:06	1.918	4.679
LS	116	2008:08	-2.518	-5.647
LS	132	2009:12	1.581	3.573
AO	182	2014:02	1.195	3.870
AO	229	2018:01	1.125	3.642

---

Annexe 16: Tableau des valeurs des outliers du prix du gaz.

L'outlier de 2008 reflète la crise financière, qui a entraîné une forte baisse de la demande énergétique. Celui de 2014 correspond à la chute des prix du gaz due à la montée en puissance de la production de gaz de schiste aux États-Unis.

Type	Ind	Time	Coefhat	Tstat
AO	82	2005:10	-764.7	-5.191
AO	117	2008:09	-800.6	-5.428

---

Annexe 17: Détection des points atypiques pour la série Importations de pétrole.

L'outlier de 2005 peut s'expliquer par les impacts des ouragans Katrina et Rita, qui ont perturbé les exportations pétrolières. Celui de 2008 est lié à la crise financière, qui a fortement réduit la demande d'importations de pétrole.

---

### 7.3 Modélisation

Rang	Statistique	10%	5%	1%
$r \leq 3$	1.46	6.50	8.18	11.65
$r \leq 2$	10.90	15.66	17.95	23.52
$r \leq 1$	29.33	28.71	31.52	37.22
$r = 0$	62.19	45.23	48.28	55.43

Annexe 18: Test de cointégration de Johansen - Statistique de trace

Le test de trace de Johansen permet de détecter le nombre de relations de cointégration dans le modèle. Ici, la statistique de test pour  $r = 0$  (62.19) est supérieure au seuil critique de 5% (48.28), indiquant au moins une relation de cointégration. De même, la statistique pour  $r \leq 1$  (29.33) est proche du seuil critique de 5% (31.52), ce qui laisse envisager une seconde relation de cointégration.

Rang	Statistique	10%	5%	1%
$r \leq 3$	1.46	6.50	8.18	11.65
$r \leq 2$	9.44	12.91	14.90	19.19
$r \leq 1$	18.43	18.90	21.07	25.75
$r = 0$	32.86	24.78	27.14	32.14

Annexe 19: Test de cointégration de Johansen - Statistique du maximum d'autovaluer

Le test du maximum d'autovaluer (lambda max) complète le test de trace en analysant la présence de relations de cointégration. La statistique pour  $r = 0$  (32.86) est supérieure au seuil critique de 5% (27.14), ce qui confirme la présence d'au moins une relation de cointégration.

---

## References

- [1] CEPII. “De l’importance de la nature des chocs pétroliers”. In: (2010). URL: <https://shs.cairn.info/revue-economique-2010-3-page-511?lang=fr>.
- [2] “Effet du prix du pétrole sur l’économie américaine”. In: (2020). URL: <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/fd525dbf-5857-4a8a-8f40-70c6eaec60af/files/01c57236-186b-4dce-b011-37c91b0a656e>.
- [3] Paul Hubert Elizaveta Archanskaïa Jérôme Creel. “L’économie mondiale 2007”. In: (2007). URL: [https://www.cepii.fr/PDF\\_PUB/em/2007/em2007-05.pdf](https://www.cepii.fr/PDF_PUB/em/2007/em2007-05.pdf).
- [4] Connaissances des énergies. “The Next Revolution”. In: (2012). URL: [https://www.connaissancedesenergies.org/oil-next-revolution-241104?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.connaissancedesenergies.org/oil-next-revolution-241104?utm_source=chatgpt.com).
- [5] Didier Houssin. “Le pétrole dans les relations américano-séoudiennes : enjeux et perspectives”. In: (2011). URL: <https://shs.cairn.info/revue-les-cahiers-de-l-orient-2011-4-page-29?lang=fr>.
- [6] “Les exportations américaines de pétrole brut à un nouveau niveau record”. In: (2024). URL: <https://www.connaissancedesenergies.org/les-exportations-americaaines-de-petrole-brut-un-nouveau-niveau-record-241104>.
- [7] Laurence Nardon. “Les États-Unis vers l’indépendance énergétique ?” In: (2013). URL: <https://shs.cairn.info/revue-politique-etrangere-2013-2-page-27?lang=fr>.
- [8] “Petrole WTI”. In: (2025). URL: <https://www.google.com/url?q=https://www.boursorama.com/bourse/matieres-premieres/cours/8xWBS/&sa=D&source=docs&ust=1738857248946540&usg=A0vVaw2uMm-AZ0bJwMQacfkCvU5q>.
- [9] “Pétrole/USA: hausse des stocks de brut, les importations montent”. In: (2024). URL: <https://www.allnews.ch/content/news/p%C3%A9troleusa-hausse-des-stocks-de-brut-les-importations-montent>.
- [10] “Prix du gaz naturel”. In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>.
- [11] “Statistical Review of World Energy – 2021”. In: (2021). URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- [12] “Taux de change USD/EUR”. In: (2025). URL: <https://webstat.banque-france.fr/fr/catalogue/exr/EXR.M.USD.EUR.SP00.E>.
- [13] “Today in Energy”. In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/>.

- 
- [14] “Vers une nouvelle géopolitique du gaz”. In: (2015). URL: <https://shs.cairn.info/revue-geoeconomie-2015-2-page-193?lang=fr>.
- [15] “Weekly Petroleum Status Report”. In: (2025). URL: <https://www.eia.gov/petroleum/supply/weekly/>.

---

## List of Tables

1	Résultats des tests de saisonnalité pour les différentes séries temporelles.	9
2	Résultats des tests de saisonnalité pour la série Importations de pétrole. .	9
3	Résultats des tests ADF et KPSS sur les séries brutes. . . . .	10
4	Résultats des tests ADF et KPSS sur les séries différenciées. . . . .	11
5	Statistiques descriptives des séries temporelles brutes. . . . .	11
6	Asymétrie et aplatissement des séries brutes. . . . .	12
7	Choix du nombre de retard. . . . .	13
8	Résultats du test de cointégration de Johansen. . . . .	13
9	Ordre des variables dans le modèle VECM. . . . .	15
10	Matrice Beta des relations de cointégration. . . . .	16
11	Matrice des coefficients $\alpha$ . . . . .	16
12	Matrice SR des restrictions sur les coefficients de court terme. . . . .	18
13	Matrice LR des restrictions sur les coefficients de long terme. . . . .	19
14	Détection des points atypiques pour la série Prix du pétrole . . . . .	24
15	Détection des points atypiques pour la série Taux de change . . . . .	25
16	Tableau des valeurs des outliers du prix du gaz. . . . .	25
17	Détection des points atypiques pour la série Importations de pétrole. . .	25
18	Test de cointégration de Johansen - Statistique de trace . . . . .	26
19	Test de cointégration de Johansen - Statistique du maximum d'autovaluer	26

## List of Figures

1	Évolution des séries temporelles au fil du temps. . . . .	8
2	Graphique des fonctions d'impulsion. . . . .	20
3	Graphique de la décomposition de la variance des erreurs de prévision. .	21
4	Histogramme des séries temporelles. . . . .	24
5	Boxplot des séries temporelles. . . . .	24

---

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Les données</b>	<b>5</b>
2.1	Choix des variables . . . . .	5
2.1.1	Importations de pétrole et produits pétroliers . . . . .	5
2.1.2	Prix moyen du pétrole . . . . .	6
2.1.3	Taux de change USD/EUR . . . . .	6
2.1.4	Prix du gaz naturel . . . . .	6
2.2	Graphique des séries . . . . .	8
2.3	Traitement des données . . . . .	9
2.3.1	Saisonnalité . . . . .	9
2.3.2	Désaisonnalisation . . . . .	9
2.3.3	Outliers . . . . .	10
2.3.4	Stationnarité . . . . .	10
2.3.5	Différenciation . . . . .	11
2.4	Statistiques descriptives . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Modèle retenu</b>	<b>13</b>
3.1	Choix du modèle . . . . .	13
3.1.1	Choix du nombre de retards . . . . .	13
3.1.2	Test de cointegration . . . . .	13
3.2	Présentation théorique des modèles . . . . .	14
3.2.1	Vector Autoregression (VAR) . . . . .	14
3.2.2	Structural Vector Error Correction Model (VECM) . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Résultats empiriques</b>	<b>15</b>
4.1	Ordre des variables . . . . .	15
4.2	VECM : Choix du modèle optimal . . . . .	15
4.2.1	Vérification des hypothèses . . . . .	15

---

4.2.2	Matrices des coefficients de cointégration $\alpha$ et $\beta$ . . . . .	16
4.2.3	Test de restrictions imposées . . . . .	17
4.3	SVECM : Restrictions de court et long terme . . . . .	18
4.3.1	Fonction d'Impulsion . . . . .	20
4.3.2	Decomposition de la variance des erreurs de previsions . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Annexes</b>	<b>24</b>
7.1	Visualisation des données . . . . .	24
7.2	Analyse des valeurs aberrantes . . . . .	24
7.3	Modélisation . . . . .	26