

Analyse géospatiale des torchères de gaz associé en **Arabie Saoudite**



Auteurs du projet :

Daria PODLOVCHENKO

Table des matières :

●	Introduction	2
●	Territoire et objet d'étude	3
●	Données	5
-	Identification des torchères de gaz associé	5
-	Vérification des torchères de gaz associé.....	7
-	Identification des villes et les zones plus touchées.....	8
●	Traitemet et analyse des données	9
-	Identification des torchères de gaz associé	9
-	Vérification des torchères de gaz associé.....	13
-	Identification des villes et des zones plus touchées.....	15
●	Résultat d'analyse	20
-	Carte 1	21
-	Carte 2	23
●	Conclusion	24
●	Sources	25

Introduction

L'objectif de ce projet est de réaliser une analyse géospatiale des torchères de gaz associé en Arabie Saoudite de 2000 à 2022. Il s'agit d'étudier la dynamique de l'utilisation des torchères et de mettre en évidence les villes et les zones naturelles protégées impactées par les émissions. Les torchères, qui brûlent le gaz excédentaire libéré lors de l'extraction pétrolière, peuvent avoir des effets significatifs sur la qualité de l'air et contribuer aux émissions de gaz à effet de serre.

La problématique principale de cette étude est de déterminer comment l'utilisation des données thermiques MODIS et du logiciel SIG QGIS peut aider à analyser la répartition spatiale des installations de torchage, la dynamique de leur utilisation et les territoires les plus affectés. Cette analyse vise à offrir des insights précieux pour comprendre les défis environnementaux et à provoquer l'adoption de mesures écologiques ultérieures par l'État.

Pour atteindre cet objectif, les tâches suivantes ont été réalisées :

- Étude des sources de données spatiales internationales et saoudiennes existantes et recherche des données appropriées pour cette étude.
- Développement d'un script Python permettant d'extraire des données sur les installations de torchage du gaz associé au pétrole à partir des données MODIS.
- Création d'une classification des installations de torchage en fonction de l'indicateur FRP et établissement de zones tampons afin d'identifier les zones naturelles et les villes affectées.
- Création de cartes basées sur les résultats de l'analyse spatiale et leur publication sous forme de cartes web interactives sur la plateforme GISCARTA, permettant aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les données de manière dynamique.

Territoire et objet d'étude

L'Arabie Saoudite (Image 1), officiellement connue sous le nom de Royaume d'Arabie Saoudite, occupe la majeure partie de la péninsule arabique. La capitale du royaume est Riyad, l'une des plus grandes villes du pays. L'Arabie Saoudite est unique en raison de son importance historique et religieuse profonde, car elle abrite les deux villes les plus sacrées de l'islam : La Mecque et Médine. Le royaume est gouverné selon les principes de la monarchie islamique, où la charia sert de base législative, et la famille Al Saoud est au pouvoir depuis la fondation du pays en 1932.



ARABIE SAOUDITE

Nom officiel : Royaume d'Arabie Saoudite

Forme de gouvernement : Monarchie absolue

Roi : Salman ben Abdelaziz Al Saoud

Capitale : Riyad

Grandes villes : Djeddah, La Mecque, Médine, Dhahran

Superficie : 2,15 millions de km²

Population : 35 millions d'habitants

Langue officielle : Arabe

Monnaie : Riyal saoudien (SAR)

Religion : Islam (les sites sacrés de l'Islam, La Mecque et Médine, sont situés en Arabie Saoudite)

PIB : L'un des plus élevés du Moyen-Orient

Produits d'exportation : Pétrole et produits pétroliers (l'un des plus grands exportateurs de pétrole au monde)

Vision 2030 : Programme de réformes économiques et sociales visant à diversifier l'économie et à réduire la dépendance aux industries pétrolières

Projets innovants : Neom, Mer Rouge etc



Image 1. Arabie Saoudite (source : infographie créé sur Figma)

L'Arabie Saoudite, l'un des plus grands exportateurs de pétrole au monde, est leader de l'OPEC et possède certaines des plus importantes réserves prouvées de pétrole au monde. L'activité principale du pays est liée à l'extraction et à l'exportation de pétrole, ce qui a un impact significatif sur l'économie

nationale. Cependant, cela entraîne également le problème de la combustion de gaz associé lors du torchage dans les installations.

Les torchères de gaz associé au pétrole (Image 2) sont des dispositifs utilisés pour brûler le gaz libéré lors de l'extraction du pétrole. Elles sont situées dans les stations de pompage, les usines de traitement du gaz et les sites d'extraction du pétrole. Ces installations sont utilisées pour éviter les émissions de gaz non utilisé dans l'atmosphère, qui peut être explosif ou contribuer à l'augmentation de l'effet de serre. Les torchères fonctionnent en enflammant le gaz, qui monte à travers un tube de 10 à 60 mètres de haut, où il brûle et se transforme en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone. La distance minimale entre les torchères est généralement d'au moins 60 mètres horizontalement pour prévenir les risques de propagation du feu ou d'explosions. Une attention particulière doit être accordée à l'emplacement des torchères, loin des zones résidentielles et de loisirs, afin de minimiser l'impact sur la population.



Image 2. Des torchères de gaz associé(source : [www.rtl.fr](http://www rtl fr))

Les torchères de gaz naturel associé sont une source significative d'émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants. La combustion de ce gaz libère dans l'atmosphère une grande quantité de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres substances nocives. Ces émissions détériorent non seulement la qualité de l'air mais contribuent également au réchauffement climatique. L'Arabie Saoudite développe de nouvelles technologies et méthodes pour une utilisation plus efficace du gaz associé. Au lieu de le brûler dans les torchères, ce gaz peut être utilisé comme source d'énergie supplémentaire ou comme matière première pour l'industrie chimique. Ces approches aident non seulement à réduire les

dommages environnementaux mais offrent également des avantages économiques supplémentaires en augmentant l'efficacité de l'extraction pétrolière.

Dans le cadre de Saudi Vision 2030, l'Arabie Saoudite cherche activement à diversifier son économie pour réduire sa dépendance au pétrole. Cela inclut le développement de sources d'énergie alternatives, telles que l'énergie solaire et éolienne, ce qui peut également contribuer à réduire l'utilisation des systèmes de torchage dans l'industrie pétrolière.

Données

Dans cette section, les données utilisées pour l'analyse géospatiale de l'industrie pétrolière en Arabie Saoudite sont décrites. Les données sont classées en trois catégories : identification des torchères de gaz associé, vérification des torchères de gaz associé et identification des villes et des zones les plus affectées par les torchères de gaz associé.

Pour identifier les torchères de gaz associé au pétrole, les données d'anomalies thermiques MODIS ont été employées. Pour vérifier la compatibilité des installations identifiées avec l'infrastructure pétrogazière de l'Arabie Saoudite, un shapefile issu de l'ARCGIS Hub de la base mondiale de l'industrie pétrogazière et une image satellite Landsat 8 ont été utilisés (pour la plus grande concentration de points). Pour identifier les villes et les zones les plus impactées par les torchères de gaz associé, des shapefiles du Système National d'Adresses d'Arabie Saoudite et de la base de données ProtectedPlanet ont été utilisés.

Identification des torchères de gaz associé

Pour l'installation de torchères de gaz associé au pétrole sur le territoire de l'Arabie Saoudite, les données MODIS/Aqua+Terra Thermal Anomalies/Fire locations (MCD14DL-NRT) de la NASA ont été utilisées. Les données MCD14DL-NRT fournissent des informations sur les anomalies thermiques et les emplacements des incendies avec une résolution de 1 km. Elles incluent les attributs suivants (Image 4) :

- **Latitude et Longitude** : Coordonnées du centre du pixel de 1 km, indiquant la zone de détection mais pas la localisation précise de l'incendie. La taille des pixels pour MODIS est d'environ 1 km. Cette détection représente une « capture » du point central du pixel, qui a été marqué comme un lieu de feu. Les satellites enregistrent les données dans le spectre infrarouge, ce qui permet de détecter les températures élevées associées aux feux actifs, même si elles se trouvent dans une petite partie du pixel (Image 3).

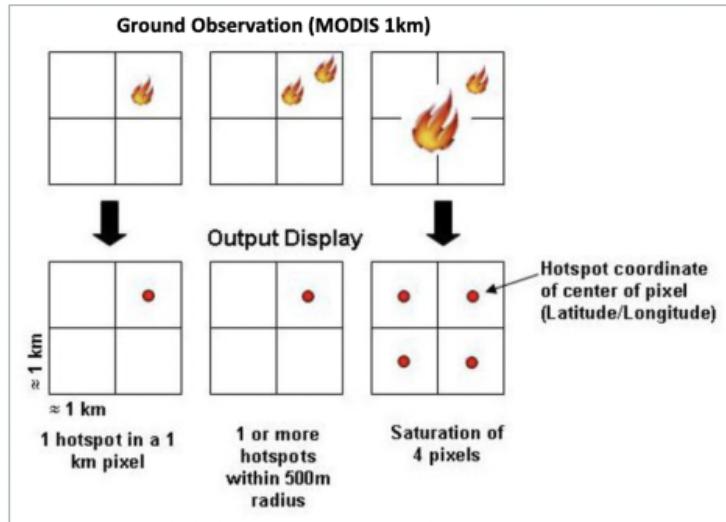
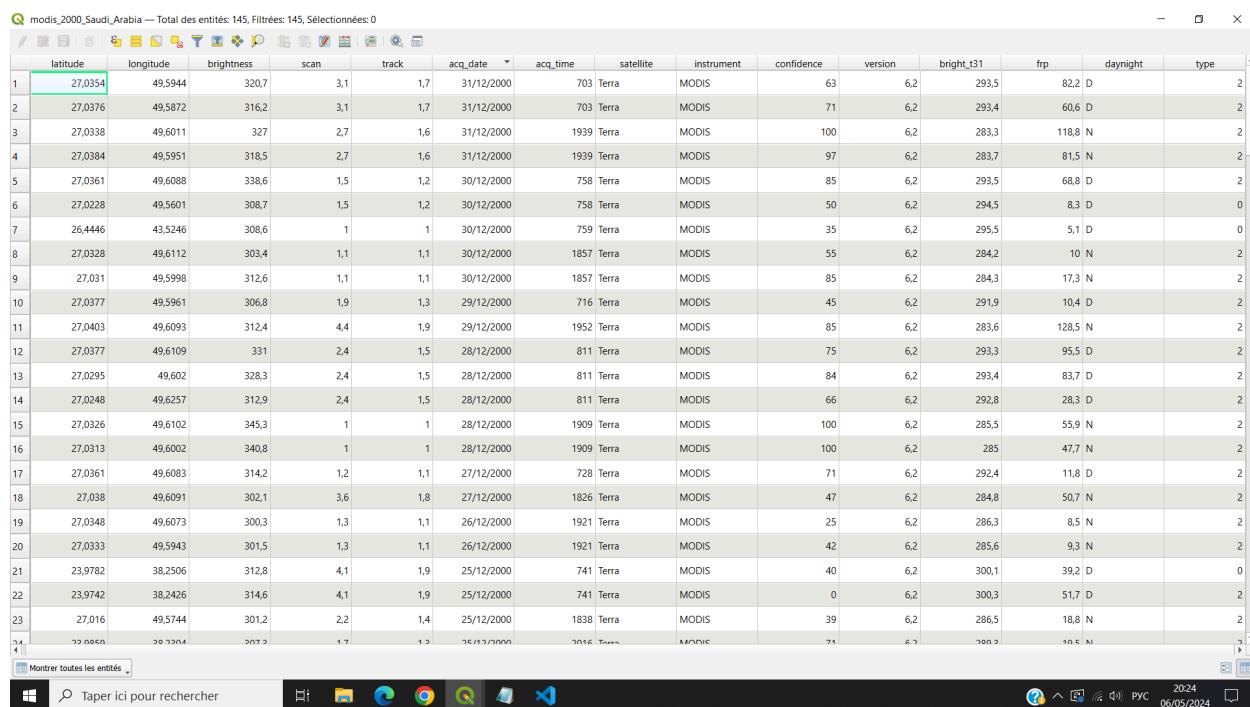


Image 3. Observation au sol et représentation des points chauds par MODIS sur une résolution de 1 km
(source : www.earthdata.nasa.gov)

- **Brightness :** Température de luminosité des canaux 21/22 du pixel de feu mesurée en Kelvin.
 - **Scan et Track :** Dimensions du pixel le long du balayage et de la trace du satellite, reflétant les dimensions réelles du pixel.
 - **Acq_Date et Acq_Time :** Date et heure de l'acquisition des données en UTC.
 - **Satellite :** Le satellite (Aqua ou Terra) depuis lequel les données ont été obtenues.
 - **Confidence :** Confiance dans la détection de 0 à 100%, reflétant la qualité des données.
- Le paramètre confidence dans les données MODIS sur les anomalies thermiques représente le niveau de confiance que le signal détecté est effectivement lié à la présence de chaleur associée à des incendies ou des torchères. Cet indicateur est extrêmement important pour le filtrage des données, car il aide à éliminer les fausses détections pouvant être causées par d'autres sources de chaleur telles que les réflexions solaires, les toits chauds ou les sources géothermiques. Dans les données MODIS, le paramètre confidence varie de 0 à 100 :
- Faible confiance : 0-30% — les données peuvent inclure beaucoup de bruit.
 - Confiance moyenne : 30-70% — niveau acceptable pour un filtrage primaire.
 - Haute confiance : 70-100% — données les plus fiables, recommandées pour des applications critiques.
- **Version :** Version de la collecte des données, indiquant la méthode de traitement.
 - **Bright_T31 :** Température de luminosité du canal 31 du pixel de feu mesurée en Kelvin.
 - **FRP (Fire Radiative Power):** Représente la puissance radiative du feu intégrée par pixel en MW (mégawatts).
 - **Type :** Type d'anomalie thermique :

- 0 – Presumed Vegetation Fire (Incendie de végétation présumé) : Ce type indique que l'anomalie thermique est probablement liée à la combustion de la végétation, comme les incendies de forêts ou de steppes.
- 1 – Active Volcano (Volcan actif) : Les points chauds de ce type sont associés à l'activité volcanique, incluant les coulées de lave, les flux pyroclastiques et autres manifestations d'activité volcanique.
- 2 – Other Static Land Source (Autres sources terrestres statiques) : Ce type peut inclure diverses sources, telles que des anomalies thermiques industrielles, des torchères de gaz associé au pétrole, ou des sources géothermiques.
- 3 – Offshore (En mer) : Les points chauds classifiés comme "offshore" sont généralement liés à des activités en mer, comme la combustion de gaz sur des plates-formes maritimes ou d'autres processus marins.
- **DayNight** : Indique si l'événement a lieu de jour ou de nuit.



	latitude	longitude	brightness	scan	track	acq_date	acq_time	satellite	instrument	confidence	version	bright_t31	frp	daynight	type
1	27,0354	49,5944	320,7	3,1	1,7	31/12/2000	703	Terra	MODIS	63	6,2	293,5	82,2	D	2
2	27,0376	49,5872	316,2	3,1	1,7	31/12/2000	703	Terra	MODIS	71	6,2	293,4	60,6	D	2
3	27,0338	49,6011	327	2,7	1,6	31/12/2000	1939	Terra	MODIS	100	6,2	283,3	118,8	N	2
4	27,0384	49,5951	318,5	2,7	1,6	31/12/2000	1939	Terra	MODIS	97	6,2	283,7	81,5	N	2
5	27,0361	49,6088	338,6	1,5	1,2	30/12/2000	758	Terra	MODIS	85	6,2	293,5	68,8	D	2
6	27,0228	49,5601	308,7	1,5	1,2	30/12/2000	758	Terra	MODIS	50	6,2	294,5	8,3	D	0
7	26,4446	43,5246	308,6	1	1	30/12/2000	759	Terra	MODIS	35	6,2	295,5	5,1	D	0
8	27,0328	49,6112	303,4	1,1	1,1	30/12/2000	1857	Terra	MODIS	55	6,2	284,2	10	N	2
9	27,031	49,5998	312,6	1,1	1,1	30/12/2000	1857	Terra	MODIS	85	6,2	284,3	17,3	N	2
10	27,0377	49,5961	306,8	1,9	1,3	29/12/2000	716	Terra	MODIS	45	6,2	291,9	10,4	D	2
11	27,0403	49,6093	312,4	4,4	1,9	29/12/2000	1952	Terra	MODIS	85	6,2	283,6	128,5	N	2
12	27,0377	49,6109	331	2,4	1,5	28/12/2000	811	Terra	MODIS	75	6,2	293,3	95,5	D	2
13	27,0295	49,602	328,3	2,4	1,5	28/12/2000	811	Terra	MODIS	84	6,2	293,4	83,7	D	2
14	27,0248	49,6257	312,9	2,4	1,5	28/12/2000	811	Terra	MODIS	66	6,2	292,8	28,3	D	2
15	27,0326	49,6102	345,3	1	1	28/12/2000	1909	Terra	MODIS	100	6,2	285,5	55,9	N	2
16	27,0313	49,6002	340,8	1	1	28/12/2000	1909	Terra	MODIS	100	6,2	285	47,7	N	2
17	27,0361	49,6083	314,2	1,2	1,1	27/12/2000	728	Terra	MODIS	71	6,2	292,4	11,8	D	2
18	27,038	49,6091	302,1	3,6	1,8	27/12/2000	1826	Terra	MODIS	47	6,2	284,8	50,7	N	2
19	27,0348	49,6073	300,3	1,3	1,1	26/12/2000	1921	Terra	MODIS	25	6,2	286,3	8,5	N	2
20	27,0333	49,5943	301,5	1,3	1,1	26/12/2000	1921	Terra	MODIS	42	6,2	285,6	9,3	N	2
21	23,9782	38,2506	312,8	4,1	1,9	25/12/2000	741	Terra	MODIS	40	6,2	300,1	39,2	D	0
22	23,9742	38,2426	314,6	4,1	1,9	25/12/2000	741	Terra	MODIS	0	6,2	300,3	51,7	D	2
23	27,016	49,5744	301,2	2,2	1,4	25/12/2000	1838	Terra	MODIS	39	6,2	286,5	18,8	N	2
24	22,000	30,5204	307,5	1,7	1,2	25/12/2000	7016	Terra	MODIS	74	6,2	280,2	10,6	N	1

Image 4. Table attributaire de données MODIS (source : QGIS)

Pour analyser et créer des cartes montrant la dynamique de l'utilisation des torchères en Arabie Saoudite, les données MODIS ont été utilisées car elles sont disponibles depuis l'année 2000, tandis que les données VIIRS ne le sont que depuis 2011.

Vérification des torchères de gaz associé

Pour confirmer que les anomalies thermiques détectées (la plus grande concentration de points) correspondent bien à des torchères, l'image satellite LC08_L1TP_164041_20220112_20220123_02_T1_B10 a été utilisées, capturé par le satellite Landsat 8 et fourni par le Service Géologique des États-Unis (USGS). Cette image, enregistrée le 12 janvier 2022 et publiée le 23 janvier 2022, a été traitée au niveau L1TP, assurant une haute précision des données géométriques et radiométriques grâce à la correction du terrain utilisant un modèle numérique de terrain. Le canal B10, un canal infrarouge thermique utilisé dans cette image, est idéal pour l'analyse des caractéristiques thermiques de la surface de la Terre. Ces données sont cruciales pour une gamme étendue de recherches et d'applications, y compris le suivi de l'état écologique, la gestion des ressources naturelles, l'agriculture, ainsi que l'analyse des changements environnementaux et la détection de la pollution thermique dans les zones industrielles.

Pour la création d'une carte de l'industrie pétrolière et confirmer que les anomalies thermiques détectées correspondent bien à des torchères, il est nécessaire de disposer de données sur les installations pétrolières et gazières afin de les corrélérer. ArcGIS propose une base de données mondiale sur l'industrie pétrolière et gazière, comprenant des informations sur les champs pétroliers, les pipelines, les centrales électriques, les puits et autres installations. Les données ont été téléchargées depuis la ressource EDX (Energy Data Exchange) et développées en utilisant des algorithmes de big data, de recherche et d'intégration de données pour recueillir des informations sur les ressources pétrolières et gazières à travers le monde, intégrant plus de 4,8 millions d'objets. Le projet a été financé par diverses organisations, y compris des fondations et des compagnies pétrolières et gazières. Les données suivantes ont été utilisées :

- **Fields.shp** — gisements de pétrole.
- **Pipelines.shp** — oléoducs pour le transport du pétrole, du gaz ou d'autres substances.
- **Processing_Plants.shp** — usines de traitement. Cette couche contient des informations sur les usines qui traitent le pétrole brut, le gaz naturel ou d'autres ressources.
- **Refineries.shp** — raffineries. Cette couche contient des données sur l'emplacement des raffineries de pétrole.
- **Wells_Vector_Grid.shp** — puits. Cette couche contient une grille vectorielle pour l'analyse de la distribution des puits.

Identification des villes et des zones les plus touchées par les torchères de gaz associé

Pour identifier les villes et les zones protégées qui sont les plus affectées par les émissions des torchères de gaz associé au pétrole, des données provenant de deux sources distinctes ont été utilisées. D'une part, les informations sur les frontières administratives et les villes ont été extraites de la plateforme cartographique du Système National d'Adresses d'Arabie Saoudite, accessible via

<https://maps.address.gov.sa/>, avec un accès sécurisé par VPN. D'autre part, les données concernant les zones protégées en Arabie Saoudite ont été obtenues depuis la plateforme ProtectedPlanet (Image 5) (<https://www.protectedplanet.net/country/SAU>), qui fournit des détails sur 70 zones protégées, y compris des territoires terrestres, des eaux intérieures et des zones marines protégées. L'analyse croisée de ces données a permis de déterminer les zones potentiellement impactées par les torchères, dans le but de proposer des mesures pour atténuer les effets néfastes sur ces régions vulnérables.

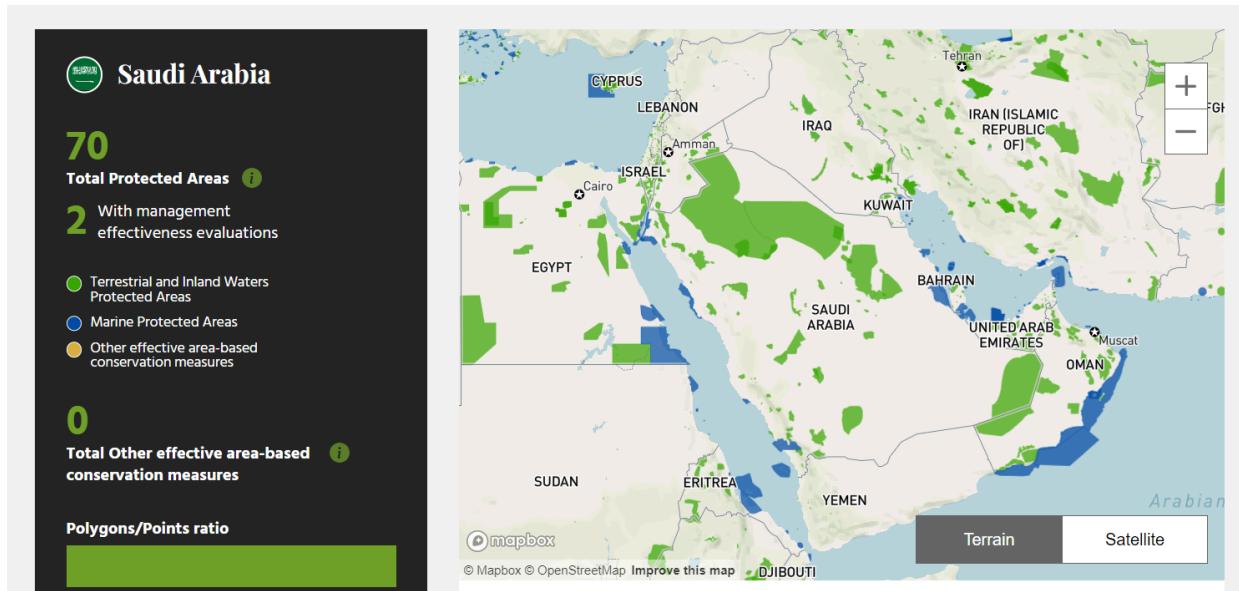


Image 5. Protected Planet (source : www.protectedplanet.net)

Traitements et analyse des données

Identification des torchères de gaz associé

Développement d'un script **testmodis.py** qui permet d'extraire des données sur les installations de torchage du gaz associé au pétrole à partir des données MODIS. Ce script a été spécifiquement conçu pour être utilisé directement dans QGIS, facilitant ainsi l'intégration et la manipulation des données géospatiales dans cet environnement SIG.

Voici l'algorithme du script et l'explication des critères d'analyse choisis :

- **Chargement des données sources :**

Importation des données MODIS à partir d'un fichier CSV, en spécifiant le type de données, le délimiteur, le système de coordonnées, et les champs pour les coordonnées.

- **Création d'une copie éditable de la couche en mémoire :**

Création d'une nouvelle couche temporaire en mémoire pour permettre l'édition des données sans modifier la couche originale.

- **Copie des attributs et des objets dans la nouvelle couche :**

Transfert de tous les attributs et objets de la couche originale vers la nouvelle couche éditable.

- **Filtrage des données selon des critères définis :**

Suppression des objets ayant un niveau de confiance faible ('confidence' <= 70) ou un type incorrect ('type' != 2). Des critères de filtrage ont été établis, basés sur le niveau de confiance et le type de sources des anomalies thermiques. Les niveaux de confiance sont divisés en trois catégories : faible (0-30 %) — les données peuvent contenir beaucoup de bruit et sont peu adaptées à une analyse précise ; moyen (30-70 %) — niveau acceptable pour un filtrage primaire ; élevé (70-100 %) — données les plus fiables, recommandées pour des applications critiques. En conséquence, les données avec un niveau de confiance inférieur à 70 % ont été exclues de l'analyse. Le type de source a également été pris en compte : 1 – volcan actif, associé à l'activité volcanique ; 2 – autres sources terrestres statiques, qui peuvent inclure des anomalies thermiques industrielles, des torchères de gaz associé au pétrole et des sources géothermiques ; 3 – installations offshore, liées à des activités maritimes. Pour les besoins de cette analyse, les sources de type 2 ont été sélectionnées car elles incluent les torchères de gaz associé au pétrole, ce qui correspond aux objectifs de l'étude.

- **Extension de la couche avec de nouveaux champs pour l'analyse :**

Pour une analyse approfondie, de nouveaux attributs ont été ajoutés aux données afin d'évaluer les caractéristiques des torchères de gaz associé au pétrole. Parmi eux, le nombre de jours de brûlage (days_burning), qui permet de prendre en compte plusieurs cas de combustion enregistrés au même endroit dans la journée, aidant ainsi à éliminer l'excès de points thermiques. Des indicateurs tels que la puissance radiative moyenne du feu (average_frp), qui reflète la quantité d'énergie dégagée lors de la combustion, ainsi que les valeurs moyennes de luminosité (average_brightness) et de caractéristique thermique supplémentaire du flambeau dans la bande infrarouge (average_bright_t31) ont également été introduits. La luminosité indique l'intensité de l'anomalie thermique dans la bande infrarouge, ce qui peut refléter la température de la torche, tandis que bright_t31 est utilisé pour une évaluation plus détaillée de l'efficacité de la combustion ou des caractéristiques de la torche elle-même. Ces champs seront calculés comme la moyenne des données regroupées par date, ce qui permet de généraliser les informations sur les multiples événements de combustion se produisant le même jour au même endroit et d'éliminer les distorsions dans les données causées par des enregistrements répétés. Les valeurs moyennes seront calculées sur la base de toutes les mesures enregistrées au cours de la journée, fournissant ainsi une évaluation plus précise et représentative de

l'activité des torchères, permettant une évaluation plus correcte de l'impact des installations de torchage sur l'environnement et l'efficacité du processus de combustion du gaz associé.

- **Agrégation des données par dates :**

Regroupement des données selon les dates de collecte et calcul des valeurs totales et moyennes pour chaque groupe.

- **Création de buffers autour des points :**

La création de zones tampons pour chaque objet de la couche avec une distance de 60 mètres. Ce rayon est fixé par la loi comme la distance minimale possible entre les torchères afin d'assurer la sécurité et de prévenir les risques liés à l'inflammation ou à l'explosion. Dans ce cas, la bufferisation permet d'éviter la duplication des données et de sélectionner uniquement celles qui respectent cette distance, car selon les règles de sécurité incendie, les torchères ne peuvent pas être situées à moins de 60 mètres les unes des autres.

- **Affichage des résultats.**

Ce script aide à identifier les torchères de gaz associé au pétrole qui étaient actives au cours d'une année spécifique et à suivre la dynamique de leur utilisation. Il fournit une analyse annuelle, permettant l'examen des données des années 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 et 2022 (Tableau 1). Cependant, il convient de noter que le script ne permet pas de déterminer avec précision l'emplacement spécifique des torchères. Cela est dû à plusieurs facteurs, y compris les limitations des systèmes satellitaires, telles que les erreurs de géopositionnement, l'impact des conditions météorologiques sur la qualité des images et le décalage potentiel des données en raison de la résolution temporelle des images.

Tableau 1. Résultats du traitement des données

	2000	2005	2010	2015	2020	2022
Avant	145	1865	2842	2915	2486	2469
Après	25	175	304	307	281	283

Analyse des données présentées :

- **Dynamique des changements :** Une augmentation significative du nombre de torchères peut être observée de 2000 à 2022, tant avant qu'après l'événement indiqué. Ceci pourrait indiquer une croissance de l'extraction du pétrole et de l'utilisation des systèmes de torchage dans cette région.

- **Comparaison « avant » et « après » :** Il est noté que le nombre de torchères augmente chaque année après l'événement, ce qui pourrait refléter la mise en place de nouvelles installations ou une diminution de l'efficacité des torchères existantes.
- **Tendances :** Bien que la tendance générale indique une augmentation, il est crucial de se concentrer sur les années spécifiques où la croissance peut être moins significative ou, au contraire, plus marquée. Cela pourrait permettre d'identifier les facteurs externes ou les changements dans les politiques et technologies qui influencent ces données.

Sur les fragments de carte présentés (Image 6), les résultats du traitement des données pour l'année 2022 sont exposés. Les points indiqués sur la carte représentent l'emplacement des torchères de gaz associé au pétrole. Sur l'image de gauche, les torchères sont montrées avant l'application du script analytique, tandis que sur l'image de droite, ces mêmes torchères sont représentées après le traitement des données. Cette visualisation permet de comparer visuellement l'efficacité du traitement des données dans la reconnaissance et l'analyse des anomalies thermiques dans la région.

Pour visualiser les résultats du script en mode interactif, il est nécessaire de suivre le lien :

[GISCARTA](#)

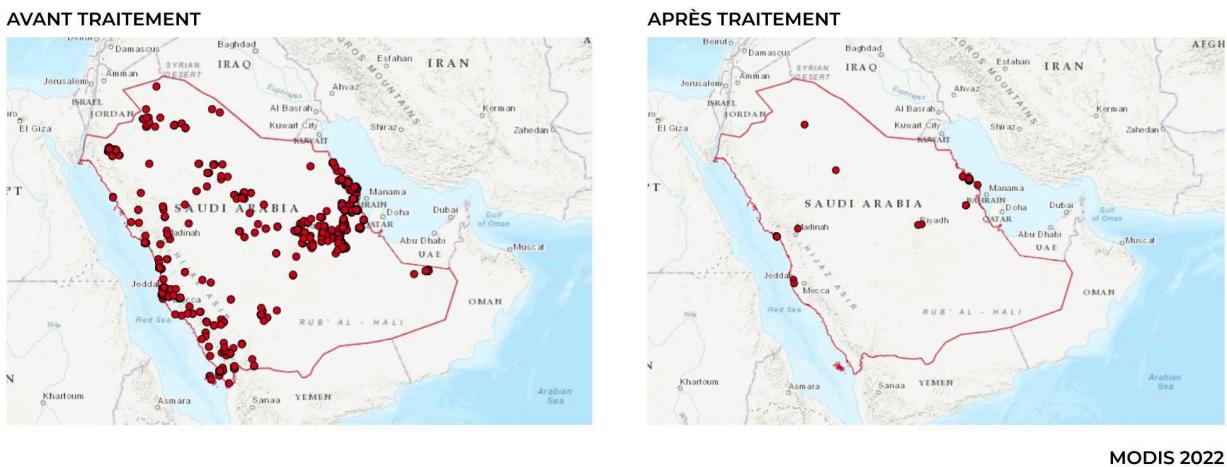


Image 6. Visualisation de l'activité des torchères de gaz associé au pétrole en Arabie Saoudite pour l'année 2022 : avant et après le traitement des données
(Créé sur QGIS & GISCARTA)

Vérification des torchères de gaz associé

Pour analyser et vérifier que la plus grande concentration de points identifiés correspondent bien à l'emplacement du complexe pétrolier en Arabie Saoudite, nous avons utilisé l'image LC08_L1TP_164041_20220112_20220123_02_T1_B10, capturée par le satellite Landsat 8 (Image 7). Ce canal spécifique (B10), relevant du spectre infrarouge thermique, est parfaitement adapté pour détecter les

anomalies thermiques indiquant des activités industrielles telles que la combustion de gaz associé au pétrole dans les raffineries. L'utilisation de cette image est essentielle pour localiser avec précision et confirmer les zones actives d'extraction et de traitement pétrolier, permettant ainsi d'évaluer l'impact environnemental et de planifier des actions pour minimiser les répercussions négatives sur l'environnement.

Pour la visualisation de l'image satellite, des paramètres ont été appliqués (Image 7) pour mieux mettre en évidence les anomalies thermiques en utilisant la bande infrarouge thermique B10 du satellite Landsat 8. La méthode des intervalles égaux est utilisée pour classifier les valeurs de température, ce qui permet de séparer clairement les différents niveaux thermiques en quatre classes. La plage de valeurs est définie de 23000 à 34000, où chaque classe est représentée par une couleur unique - du bleu pour les températures les plus basses au rouge pour les plus élevées. Ce réglage permet de mettre visuellement en évidence les zones les plus chaudes, correspondant à l'emplacement de l'industrie pétrolière et gazière. L'augmentation du contraste et l'ajustement de la luminosité renforcent davantage la distinction entre les zones, rendant la carte plus lisible pour l'analyse et l'interprétation des données.

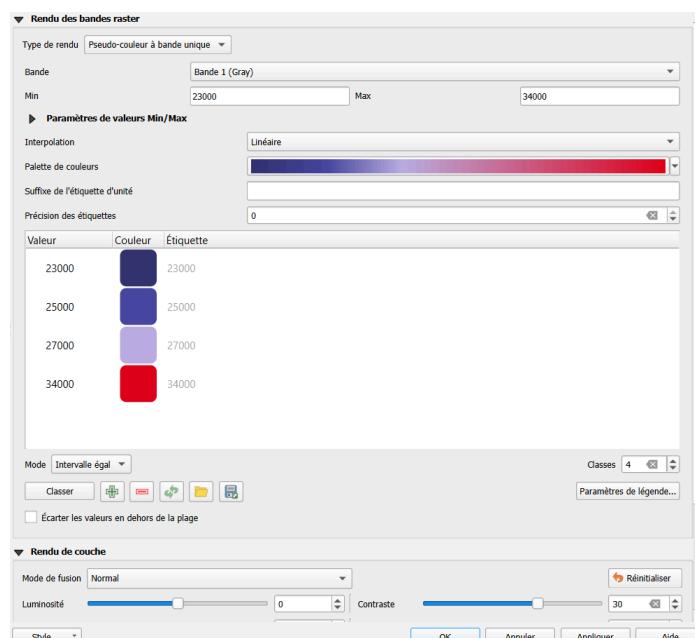
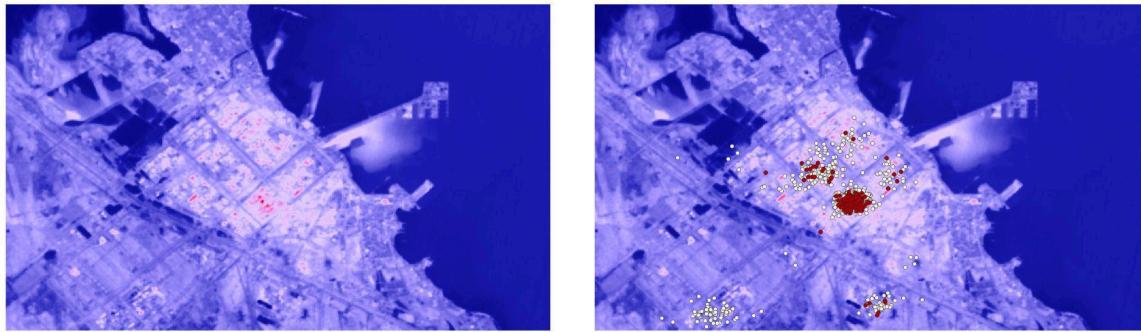
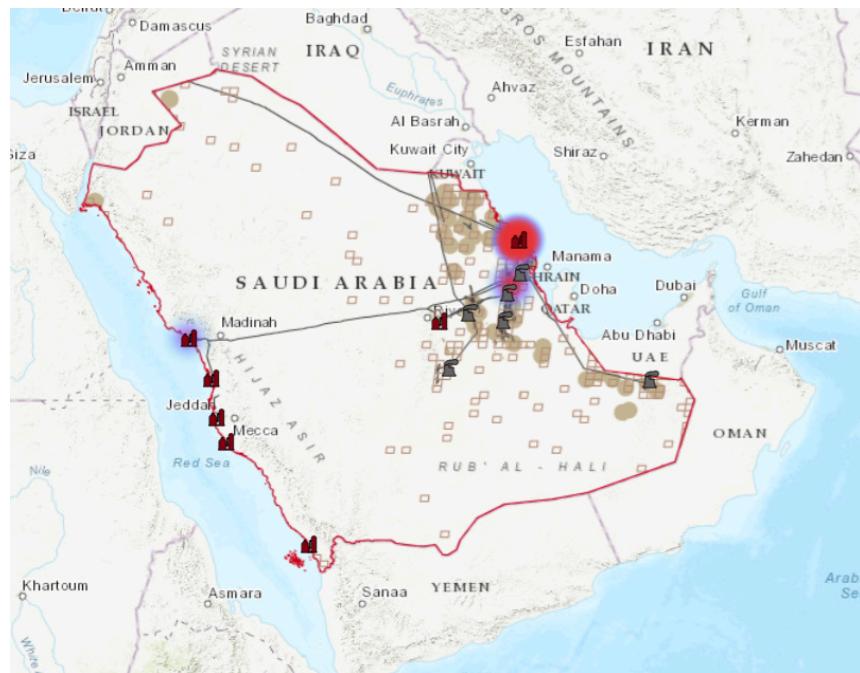


Image 7. Visualisation des anomalies thermiques dans l'industrie pétrolière en Arabie Saoudite via la bande infrarouge B10 de Landsat 8
(Créé sur QGIS)



*Image 8. Corrélation entre les anomalies MODIS 2022 et l'image Landsat 8,
points blancs - avant traitement, points rouges - après
(Créé sur QGIS)*

Ensuite, dans le cadre de l'analyse géospatiale, une vérification visuelle a été effectuée pour confirmer que les torchères de gaz associé identifiées correspondent bien aux installations du secteur pétrolier et gazier de l'Arabie Saoudite. Cette vérification repose sur les données fournies par la base ArcGIS Hub, qui renseigne sur l'emplacement des infrastructures de l'industrie pétrolière et gazière, incluant les champs pétrolifères, les puits de pétrole, les raffineries, etc. Un extrait de la carte finale (Image 8), qui sera présenté dans la section des résultats du travail, illustre la correspondance géographique entre les anomalies MODIS et l'infrastructure de production de pétrole.



*Image 8. Corrélation entre les anomalies MODIS et les infrastructures pétrolières en Arabie Saoudite
(Créé sur QGIS & GISCARTA)*

La plus grande concentration de points sur la carte correspond à la zone industrielle d'Al Jubail (Image 9), en Arabie Saoudite. Cette région est l'un des plus grands complexes industriels du monde, comprenant des usines pétrochimiques, des aciéries et d'autres grandes productions de l'industrie lourde.



Image 9. La zone industrielle d'Al Jubail
(Source : earthobservatory.nasa.gov)

La ville d'Al Jubail a été spécialement conçue et construite comme un centre industriel majeur depuis les années 1970, dans le cadre de la stratégie de diversification économique de l'Arabie Saoudite. Située sur la côte du Golfe Persique dans la province orientale du Royaume, Al Jubail joue un rôle clé dans le développement économique de la région.

Grâce à son emplacement stratégique près du port industriel King Fahd, Al Jubail sert de hub important pour l'exportation et l'importation de produits industriels, soulignant son importance en tant que l'un des centres industriels leaders dans le monde, notamment dans les domaines de la pétrochimie et de la métallurgie.

Identification des villes et des zones les plus touchées par les torchères de gaz associé

Comme défini précédemment, notre projet vise à identifier les zones et les villes les plus affectées par les émissions des torchères de gaz en Arabie Saoudite pour les données les plus actuelles de l'année 2022. Pour cela, des buffers ont été créés sur QGIS autour de chaque torchère en se basant sur leur

puissance radiative (FRP, mesurée en mégawatts) afin de déterminer l'étendue de l'impact environnemental direct.

Trois zones tampons ont été établies à des distances de 5 km, 10 km et 30 km, en fonction de l'intensité du Fire Radiative Power (FRP). Cette sélection spécifique de distances nécessite une justification, mettant en lumière le lien entre la puissance radiative du feu et son potentiel impact environnemental. Le FRP évalue la puissance radiative d'un feu, qui est directement corrélée à l'énergie thermique dégagée lors de la combustion. Par conséquent, des valeurs plus élevées de FRP indiquent une libération d'énergie plus conséquente, pouvant accroître l'impact environnemental et sanitaire sur des distances plus étendues.

- **FRP de 0 à 50 MW - Buffer de 5 km :** Les torchères avec un FRP entre 0 et 50 MW représentent les émissions les plus basses de notre étude. Bien que relativement faibles, ces émissions peuvent toujours avoir un impact sur l'air local et la qualité de vie des populations avoisinantes. Un buffer de 5 km est utilisé pour surveiller et analyser les impacts potentiels sur les zones résidentielles et écologiques proches, ce qui est particulièrement pertinent dans des régions densément peuplées ou sensibles sur le plan environnemental.
- **FRP de 50 à 100 MW - Buffer de 10 km :** Pour les torchères émettant avec une intensité de FRP entre 50 et 100 MW, l'énergie dégagée est plus significative, justifiant un buffer étendu à 10 km. Cette distance est choisie pour encapsuler un périmètre plus large, prenant en compte les effets potentiels non seulement sur la qualité de l'air mais aussi sur la santé publique. Cette zone permet d'évaluer les impacts sur une échelle plus grande, incluant des effets cumulatifs qui pourraient ne pas être immédiatement apparents à proximité immédiate des torchères.
- **FRP de 100 à 303 MW - Buffer de 30 km :** Les torchères fonctionnant à des niveaux de FRP de 100 à 303 MW (la valeur maximale observée dans notre étude) représentent les émissions les plus intenses. Un buffer de 30 km est justifié par la nécessité de comprendre les impacts étendus de telles émissions, qui peuvent inclure des modifications significatives de la qualité de l'air sur de longues distances, des risques accrus pour la santé humaine, et des impacts écologiques profonds. Ce buffer large est crucial pour évaluer les impacts environnementaux sur des zones plus vastes, incluant des écosystèmes sensibles ou des communautés éloignées susceptibles d'être affectées par des polluants transportés par le vent ou par des retombées de particules.

Pour justifier l'utilisation de la puissance radiative du feu (FRP) et l'établissement de zones tampons autour des installations de torchage en Arabie Saoudite, les sources suivantes ont été utilisées :

- BG - Relations variées entre la puissance radiative du feu et la taille du feu à l'échelle mondiale : Cette étude examine la relation entre la taille des foyers d'incendie et leur puissance radiative à

l'échelle mondiale. Le FRP mesure l'énergie émise lors de la combustion et sert d'indicateur de l'intensité du feu. Les données sont obtenues à partir des produits MODIS et MERIS, confirmant ainsi la pertinence de choisir différentes zones tampons en fonction des valeurs de FRP [Source : [Biogeosciences](#)].

- Remote Sensing | Dynamique de l'activité des feux et de la consommation de carburant en Afrique subsaharienne : Cette recherche analyse la dynamique des incendies et de la consommation de carburant en Afrique subsaharienne en utilisant les données de FRP. L'étude montre que le FRP est directement lié aux émissions de polluants et à l'énergie thermique, ce qui a un impact significatif sur la qualité de l'air et la santé des populations à grande distance. Cela justifie le choix de zones tampons plus larges pour des valeurs de FRP plus élevées [Source : [MDPI](#)]

Ces études (Image 10) démontrent que l'utilisation de zones tampons de 5 km, 10 km et 30 km pour différents niveaux de FRP (de 0 à 303 MW) est justifiée et aide à évaluer adéquatement l'impact des émissions de torchage sur l'environnement et la santé publique.

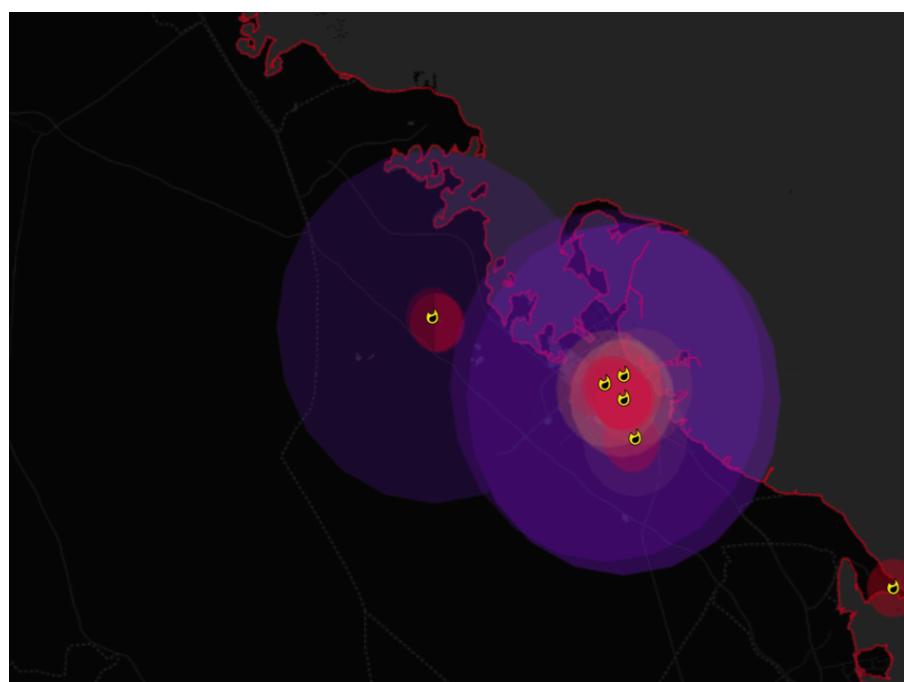
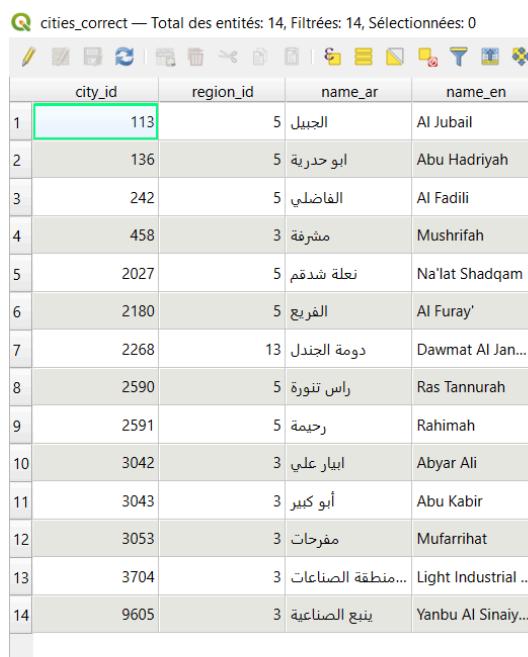


Image 10. Zones tampons basées sur l'intensité du Fire Radiative Power (FRP)
(Créé sur QGIS et GISCARTA)

Ensuite, les villes et les zones qui chevauchent ces buffers ont été identifiées afin de repérer celles susceptibles d'être les plus affectées par les émissions des torchères. Toutes ces opérations ont été

exécutées dans QGIS en utilisant les outils de traitement pour créer des buffers et effectuer l'analyse des intersections.

Sur la base de l'analyse spatiale, les villes suivantes (Image 11) ont été identifiées comme étant touchées par les émissions des torchères associées à l'extraction de pétrole et de gaz en Arabie Saoudite :



	city_id	region_id	name_ar	name_en
1	113	5	الجبيل	Al Jubail
2	136	5	ابو حدرية	Abu Hadriyah
3	242	5	الفاضلي	Al Fadili
4	458	3	مشرفه	Mushrifah
5	2027	5	نعلة شدقم	Na'lat Shadqam
6	2180	5	الفریع	Al Furay'
7	2268	13	دومة الجندي	Dawmat Al Jan...
8	2590	5	راس تنورة	Ras Tanurah
9	2591	5	رحيمة	Rahimah
10	3042	3	أبيار علي	Abyar Ali
11	3043	3	أبو كبير	Abu Kabir
12	3053	3	مفروحات	Mufarrihat
13	3704	3	منطقة الصناعات...	Light Industrial ...
14	9605	3	بنبع الصناعية	Yanbu Al Sinaiy...

Image 11. Villes touchées par les émissions des torchères
(Créé sur QGIS)

Centres industriels et pétrochimiques : Ces villes sont de grands centres industriels où sont concentrés de nombreux complexes industriels et pétrochimiques, ce qui explique leur exposition significative aux émissions des torchères.

- Al Jubail (الجبيل) : Important centre industriel et pétrochimique sur la côte est.
- Yanbu Al Sinaiyah (بنبع الصناعية) : Grand centre industriel sur la côte ouest.

Villes à proximité des grandes raffineries et des sites d'extraction de pétrole : Ces villes sont situées près des grandes raffineries et des champs pétrolifères, ce qui les rend vulnérables aux émissions des torchères.

- Ras Tanurah (رأس تنورة) : L'une des plus grandes raffineries du monde, située près du champ pétrolifère de Ghawar.
- Rahimah (رحمة) : La proximité de Ras Tanurah augmente l'exposition aux émissions.
- Abu Hadriyah (أبو حدرية) : Située près de plusieurs champs pétrolifères.

-
- Al Fadili (الفاضلي) : Petite ville près des complexes industriels.
 - Dawmat Al Jandal (دومة الجندل) : Centre historique et économique entouré de sites pétroliers.

Petites villes et villages dans les zones d'extraction de pétrole : Ces villes, bien que de taille plus petite, sont également affectées par les émissions en raison de leur proximité avec les champs pétrolifères et les torchères.

- Mushrifah (مشرفه) : Proche des complexes industriels.
- Na'lat Shadqam (نعلة شدقم) : Entourée de champs pétrolifères.
- Al Furay' (الفرع) : Proche des zones d'extraction de pétrole.
- Abyar Ali (أبار علي) : Située dans la province de Médine.
- Abu Kabir (أبو كبير) : Petite ville dans la province de l'Est.
- Mufarrihat (مفراحات) : Située dans une région riche en ressources pétrolières.

Ensuite, les zones protégées ont été identifiées:

Khalij Tarut (خليج تاروت) : Le golfe de Tarut est un écosystème important avec une biodiversité marine riche. En tant qu'écoparc, cette zone protège des écosystèmes marins et côtiers uniques. Le golfe se trouve dans une région d'extraction intensive et de transport de pétrole.

Jubail Marine Wildlife Sanctuary (محمية الجبيل لإنجذاب الحياة البحريّة) : Le sanctuaire marin à Jubail est destiné à protéger la vie marine et les écosystèmes. Il constitue une zone importante pour la reproduction et l'habitat de diverses espèces marines. Jubail est l'un des plus grands centres industriels d'Arabie Saoudite avec de nombreuses raffineries de pétrole.

The Haram of Al-Madinah (حرم المدينة المنورة) : La zone protégée de Médine possède une grande importance religieuse et culturelle. Médine est située à proximité de grands champs pétrolifères, comme Ghawar, et d'installations de raffinage de pétrole.

Yanbu' Coastal Conservation Area (محمية ينبع الساحلية) : La réserve côtière de Yanbu protège d'importants écosystèmes côtiers, fournissant un habitat à de nombreuses espèces marines. Yanbu est un grand centre industriel et pétrochimique sur la côte ouest.

Sabkhat al-Fasl (سبخة الفصل) : La réserve de Sabkhat al-Fasl protège des écosystèmes salins uniques, qui jouent un rôle important dans le maintien de la biodiversité et des services écosystémiques. Cette région est exposée aux activités d'extraction et de raffinage de pétrole.

Q zones_correct — Total des entités: 5, Filtrées: 5, Sélectionnées: 0

	WDPAID	WDPA_PID	PA_DEF	NAME	ORIG_NAME	DESIG	DESIG_ENG
1	11993,0000000...	11993	1	Khalij Tarut	خليج تاروت	منتزه بيلى	Eco-Park
2	61786,0000000...	61786	1	Jubail Marine Wildlife Sanctuary	محمية الجبيل للحياة البرية	منطقة محمية	Protected Area
3	101853,000000...	101853	1	The Haram of Al-Madinah	حرم المدينة المنورة	حرم	Inviolable Sanctuary
4	101921,000000...	101921	1	Yanbu' Coastal Conservation Area	محمية بنبع الساحلية	محمية	Reserve
5	555624818,000...	555624818	1	Sabkhat al-Fasl	سبخة الفضل	محمية	Reserve

Image 12. Zones naturels touchées par les émissions des torchères
(Créé sur QGIS)

L'analyse spatiale a identifié plusieurs villes et zones protégées en Arabie Saoudite touchées par les émissions des torchères de gaz associées à l'extraction de pétrole. Ces régions, telles que Al Jubail, Yanbu et le golfe de Tarut, nécessitent des mesures spécifiques pour réduire les impacts environnementaux et protéger la biodiversité et la santé publique.

Résultat d'analyse

Dans le cadre de ce projet, deux cartes interactives ont été créées et publiées sur la plateforme **GISCARTA** (Image 12) :

1. Carte de la dynamique d'utilisation des torchères de gaz associé au pétrole ;
2. Carte des zones d'impact des torchages sur les villes et les zones naturelles protégées.

The screenshot shows the GISCARTA website interface. At the top, there is a navigation bar with links for Product, Pricing, Use Cases, Map Gallery, Blog, About us, Contacts, Sign up, and Log in. A prominent banner on the left side reads "CREATE YOUR OWN MAPPING APP SIMPLY!" in large white and teal text, with a "GET STARTED FOR FREE" button below it. On the right side, there is a map with several layers and a sidebar titled "Widgets" containing options like Basemaps, Legend, Time slider, Elevation profile, Attribute table, Print, and Scale bar. A cookie consent message at the bottom left states "This website uses cookies to ensure you get the best experience" with "OK" and "More info" buttons.

Image 12. GISCARTA (source : www.giscarta.com)

GISCARTA est une application web pour la publication de cartes interactives en ligne. Voici ses principaux avantages :

- L'application propose deux méthodes de chargement de données géospatiales dans divers formats, y compris shp, geojson et tif, sur sa plateforme : directement via l'interface web ou à l'aide d'un plugin pour QGIS (Image 13), ce qui permet aux utilisateurs d'ajouter, d'éditer et de gérer leurs données en ligne.

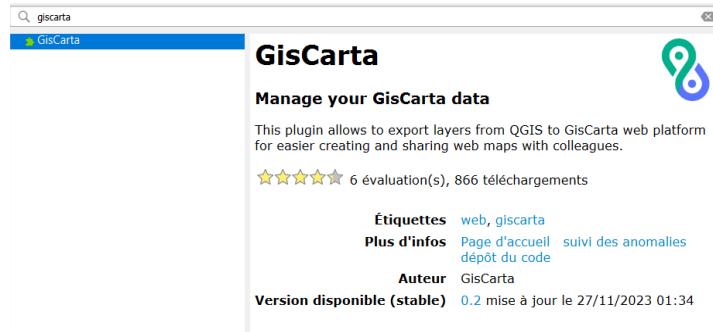


Image 13. GisCarta (source : QGIS)

- L'application fournit un widget d'intelligence artificielle pour les données géographiques, qui permet de traiter les données en utilisant des requêtes textuelles pour obtenir des informations d'Open Street Map, après quoi il est possible de modifier, styliser et gérer ces couches sur la carte.
- Sur la plateforme GISCARTA, il est possible de travailler non seulement avec des couches vectorielles, mais aussi avec des couches raster, en configurant des rasters monobande et multibande.
- Sur GISCARTA, les utilisateurs peuvent créer des fenêtres d'information personnalisables et flexibles, en contrôlant leur contenu et leur emplacement, y compris l'activation/désactivation de la fenêtre, la modification du titre et de l'emplacement de la fenêtre, ainsi que l'ajout, l'exclusion et la réorganisation des attributs à l'intérieur de la fenêtre.

Carte 1 : La dynamique d'utilisation des torchères de gaz associé au pétrole

Suite à une analyse géospatiale, une carte interactive intitulée **Carte de la dynamique d'utilisation des torchères de gaz associé au pétrole** (Image 14) a été créée, affichant la dynamique de l'utilisation des torchères pour brûler le gaz naturel associé au pétrole en Arabie Saoudite de 2000 à 2020. L'échelle de temps sur la carte est conçue pour montrer les données tous les cinq ans : 2000, 2005, 2010, 2015, 2020. Les points sur la carte, qui représentent les torchères, ont été traités à l'aide du script **testmodis.py** dans le logiciel QGIS.

Pour accéder à la carte, il est nécessaire de suivre le lien :

[GISCARTA](#)

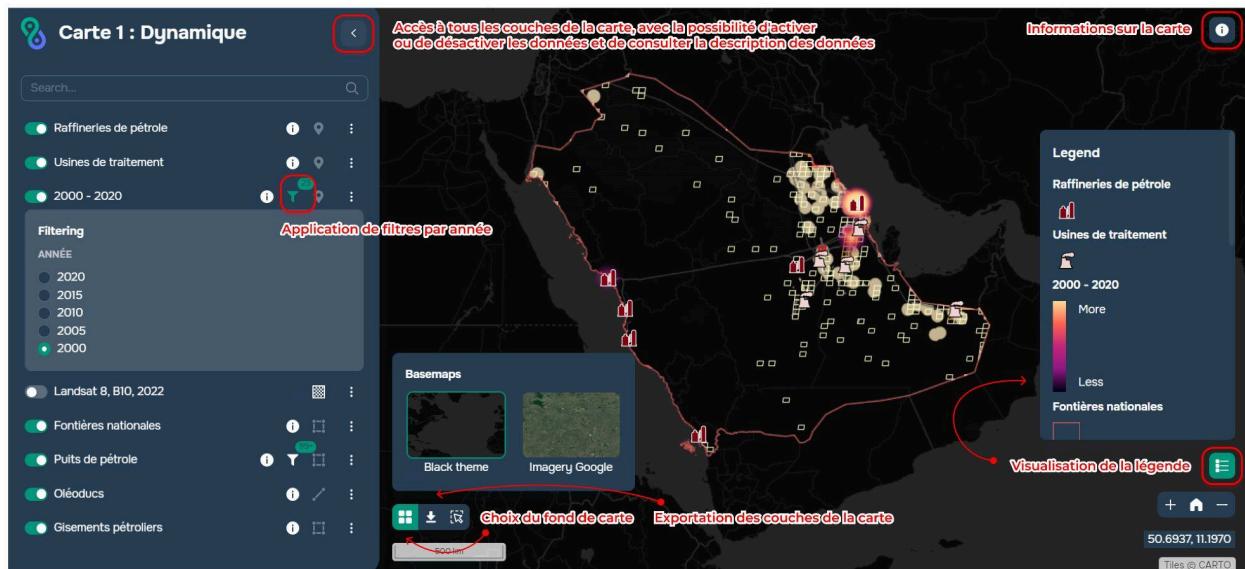


Image 14. Interface de la carte interactive avec options de filtrage et de personnalisation
(source : GISCARTE)

La source des données sur les torchères est le système FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA. La carte montre des icônes indiquant les raffineries de pétrole et d'autres installations liées au pétrole, dont les données proviennent de la base de données Global Oil and Gas Features (Energy Data eXchange & ArcGIS Hub).

Les torchères sont également représentées sur la carte selon leur Puissance Rayonnante du Feu (PRF ou FRP en anglais pour Fire Radiative Power), qui mesure l'énergie émise par le feu en unité de temps, généralement exprimée en mégawatts (MW). La PRF peut être considérée comme un indicateur quantitatif de la puissance thermique d'un feu. Dans le contexte de la combustion du gaz associé au pétrole, la PRF permet d'évaluer le volume d'énergie dégagée.

Cette carte interactive dotée de divers éléments fonctionnels :

- Accès à toutes les couches de la carte - Accès à toutes les couches de la carte avec la possibilité d'activer ou de désactiver des données spécifiques et de consulter leurs descriptions. Cela permet aux utilisateurs de personnaliser les informations affichées selon leurs besoins.
- Application de filtres par année - Application de filtres annuels (2000, 2005, 2010, 2015, 2020) pour analyser la dynamique des changements sur la carte sur les périodes sélectionnées.
- Exportation des couches de la carte - La fonction d'exportation des couches permet aux utilisateurs de sauvegarder ou de transférer des données dans d'autres formats pour un traitement ou une présentation ultérieurs.
- Informations sur la carte - Fourniture d'informations détaillées sur la carte.

- Visualisation de la légende - Visualisation de la légende de la carte qui explique les icônes et les indicateurs de couleur utilisés pour différents types de données sur la carte.
- Choix du fond de carte - Sélection du fond de carte (thème noir ou images de Google), permettant de modifier l'apparence de la carte pour améliorer la lisibilité ou la présentation visuelle des données.

Cette carte interactive est essentielle pour visualiser et analyser l'impact environnemental des torchères de gaz en Arabie Saoudite sur une période de 20 ans. Elle permet de suivre la dynamique de l'utilisation des torchères et d'identifier les zones et villes les plus affectées.

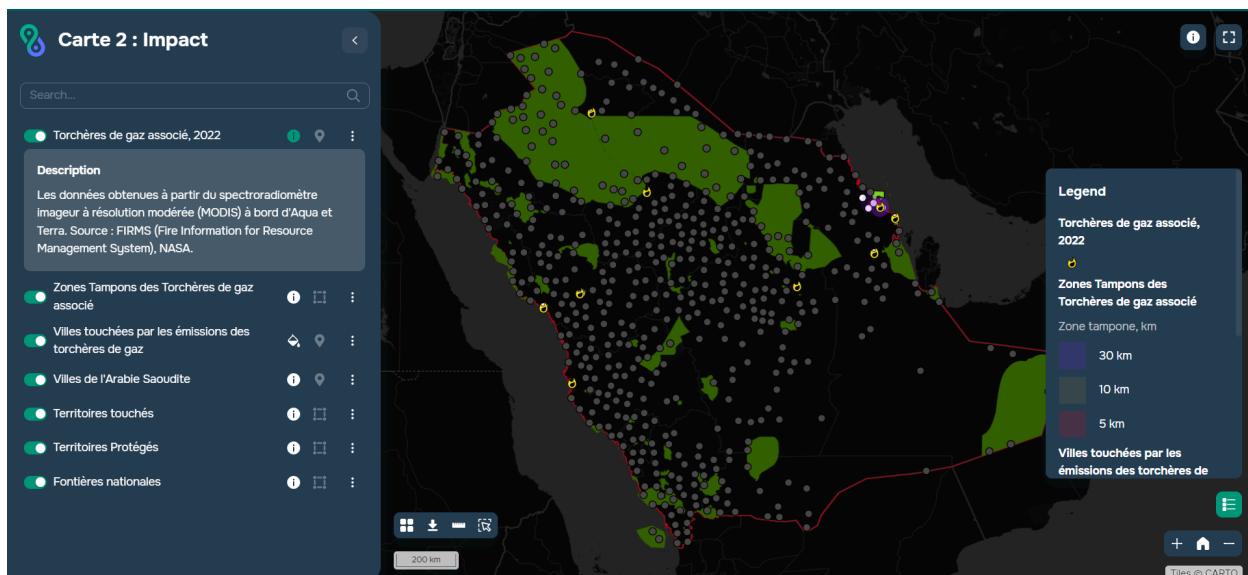
Carte 2 : Des zones d'impact des torchages sur les villes et les zones naturelles protégées

La deuxième carte (Image 15) créée dans le cadre de ce projet est une carte de l'influence des installations de torchage sur les villes voisines et les zones naturelles protégées selon les données de 2022 (les données les plus récentes).

La carte interactive fonctionne de manière similaire à la Carte 1.

Pour accéder à la carte, il est nécessaire de suivre le lien :

[**GISCARTA**](#)



*Image 15. Interface de la carte interactive avec options de personnalisation
(source : GISCARTA)*

Cette carte montre quelles villes et quelles zones naturelles protégées sont les plus exposées aux émissions et aux polluants produits par ces installations de torchage.

Conclusion

Dans le cadre de cette analyse géospatiale, toutes les données disponibles sur les anomalies thermiques, ainsi que les bases de données nécessaires à la cartographie et à l'analyse des résultats, ont été étudiées : base de données de l'industrie pétrolière et gazière, base de données des villes d'Arabie Saoudite et des zones de protection de l'environnement. Ensuite, un traitement des données vectorielles et raster a été réalisé dans le logiciel QGIS, en utilisant l'environnement spatial Python et les outils géospatiaux. Une analyse des résultats obtenus a également été effectuée : identification des installations de torchage à partir des données thermiques de MODIS et leur correspondance avec l'infrastructure pétrolière et gazière, ainsi qu'une analyse de la dynamique des installations de torchage sur 20 ans ([Carte 1](#)). De plus, les villes et les zones de protection de l'environnement les plus affectées par les émissions ont été identifiées ([Carte 2](#)). Les résultats ont été publiés sous forme de cartes interactives à l'aide de GISCARTA. La méthodologie de réalisation de ce projet est présentée dans l'infographie (Annexe 1).

Les résultats de ce projet sont illustrés par deux cartes principales. La première carte montre la distribution et l'évolution des installations de torchage sur une période de 20 ans. La seconde carte identifie les zones urbaines et les réserves naturelles les plus affectées par les émissions de torchage. Ces cartes fournissent des outils visuels essentiels pour les décideurs politiques et les gestionnaires environnementaux, facilitant ainsi une meilleure planification et la mise en œuvre de mesures de réduction des émissions.

L'analyse des données présentées sur la première carte montre une augmentation significative du nombre d'installations de torchage de 2000 à 2022. En 2000, le nombre d'installations de torchage actives était beaucoup plus faible, mais il a fortement augmenté d'ici 2010, ce qui peut être lié à l'expansion de l'industrie pétrolière et gazière en Arabie Saoudite. La concentration régionale des installations de torchage est particulièrement marquée à proximité des grands centres industriels et des zones d'extraction, comme Al Jubail, situé près du plus grand gisement de pétrole au monde, Ghawar, ce qui souligne la corrélation entre l'activité industrielle et les niveaux d'émissions.

Sur la base de l'analyse, les villes et les zones protégées les plus affectées par les émissions des torchères ont été identifiées. Au total, 7 grands centres industriels et 6 villes proches des raffineries et des champs pétrolifères ont été déterminés. De plus, 5 petites villes et villages situés dans les zones d'extraction de pétrole ont été identifiés. En outre, 5 zones protégées, y compris des écosystèmes marins et des écosystèmes salins uniques, vulnérables aux émissions, ont été repérées.

Ces résultats permettent de mieux comprendre l'impact environnemental des torchères et d'orienter les efforts de réduction des émissions vers les zones les plus vulnérables. L'analyse ne permet pas de déterminer l'emplacement exact des torchères en fonction des données de départ, mais elle permet de

révéler la dynamique d'utilisation des installations de torchage, ainsi que d'identifier les zones les plus affectées par ces installations.

Sources

Textes :

1. **Saudi Vision 2030** - رؤية السعودية - Une vision pour l'avenir de l'Arabie Saoudite, soulignant les objectifs de développement durable et de diversification économique.
[Vision 2030](#)
2. **NASA Earthdata** - Description des données NASA FIRMS.
[Near-Real Time FIRMS Data](#)
3. **NASA Earthdata** - Description du principe de fonctionnement des capteurs MODIS.
[FIRMS](#)
4. **НАДЗОР-ИНФО** - Informations sur les distances entre les installations de torchage.
[Nadzor-info](#)
5. **MDPI & Copernicus** - Informations sur les distances pour des zones tampons autour des installations de torchage.
[MDPI / Copernicus](#)

Données :

1. **NASA FIRMS** - Fournit des données d'anomalies thermiques et des emplacements de feu pour la surveillance mondiale des incendies.
[FIRMS \(Fire Information for Resource Management System\)](#)
2. **Protected Planet** - Fournit des informations sur les zones protégées à travers le monde, incluant les territoires terrestres et marins.
[Zones protégées en Arabie Saoudite](#)
3. **Système National d'Adresses d'Arabie Saoudite** (Accès au site via VPN) - Plateforme pour l'accès aux données cartographiques et aux informations sur les villes et les zones en Arabie Saoudite.
[Système National d'Adresses](#)
4. **ArcGIS Hub** - Plateforme de partage et d'intégration de données géospatiales relatives à divers aspects environnementaux et industriels.
[Global Oil and Gas Features](#)
5. **GeoBoundaries** - Source de données téléchargeables pour les frontières géopolitiques internationales.
[Téléchargement des frontières géopolitiques](#)
6. **EarthExplorer** - Source de données téléchargeables pour images satellites.
[USGS](#)
7. **NASA Earth Observatory** - Informations et images satellites de la ville d'Al Jubail.
[Al Jubail Industrial City at Night](#)

La schéma expliquant les étapes effectuées :

