

OneTech

R&D Sustainability / Laboratoire Qualité de l'Air

To: Mathieu VAISSIERE, Beatrice MARCHAL

From: Olivier DUCLAUX, Thomas CAMPMAS

Copy: LQA team, HSE

Date: --- Revision du 06/03/2024

Subject: Analyse de l'impact des émissions atmosphériques de benzène à la suite de la fuite du bac d'essence P551 de Donges en décembre 2022.
Complément et scénario alternatif Révision après échange avec les équipes de l'INERIS du 19/01/2024

Ref CEDRE - RDL-CO2 and SU-PS-LQA-M-2024

I. Introduction et rappel des faits

Lors du remplissage d'un navire, le bac P551, contenant de l'essence, a eu l'un de ses hélicomélangeurs qui a commencé à fuir le 21/12/2022 vers 17 h, entraînant l'écoulement du produit dans la cuvette de rétention.

L'identification d'odeur à l'extérieur du site, et le lancement de recherche au sein de la raffinerie a permis de détecter la fuite vers 19h30.

Le service sécurité de la raffinerie a rapidement mis en place un tapis isolant d'eau avec de la mousse sur l'étendue de la cuvette de rétention (8 300 m²), et les minutes de la gestion de crise montre que ce tapis a été complètement déployé dès 20h07. Des actions pour entretenir ce tapis de mousse ont eu lieu régulièrement. La fuite a été réduite à un filet résiduel par action sur l'agitateur le 22/12/23 à 7h.

A compter du 22/12 à 17h, des opérations de pompage pour vidanger le produit contenu dans la cuvette (eau + essence + émulseur) dans un autre bac ont été mises en œuvre.

La cuvette est vidée le 28/12 matin à 5h30 et rincée l'après-midi.

Le suivi de la qualité de l'air pendant tout l'évènement et les jours qui ont suivi a été réalisé par les équipes de la raffinerie conjointement avec les sapeurs-pompiers du SDIS 44 et Air Pays de la Loire qui a déployé différents moyens mobiles à la demande de la Plateforme TotalEnergies Raffinage France de Donges.

Durant la durée de l'évènement, il a été constaté que, malgré le tapis de mousse régulièrement entretenu pour limiter les effets du vent sur celui-ci, le produit contenu dans la cuvette a généré des odeurs d'essence qui ont été ressenties dans le bourg de Donges.

Les mesures réalisées par Air Pays de la Loire ont permis de quantifier l'influence de l'évènement sur la qualité de l'air au niveau des premières habitations.

Sur cette période, d'après les informations données par l'ARS lors de la réunion de RETEX organisée par la Préfecture, il n'a été signalé aucune admission aux urgences, ni de consultations médicales en lien avec la fuite d'essence.

L'analyse par les hygiénistes (TotalEnergies Raffinage France et INERIS) des concentrations de COV mesurées met en avant que le composé susceptible d'entraîner sur les populations avoisinantes un effet sanitaire est le benzène, composé CMR.

Il est retenu de considérer comme concentration cible de comparaison la Valeur Guide de la Qualité de l'Air Intérieur (VGAI) de 28,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit environ 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.¹

Le présent travail a pour but de déterminer au mieux les émissions de benzène et d'évaluer les concentrations auxquelles les populations ont été exposées si elles se trouvaient à l'extérieur de leur habitation durant la période du 21/12/2022 à partir de 17 h (début fuite d'essence), jusqu'à la fin des opérations de nettoyage le 28/12/2022.

Le travail va donc se décomposer en deux parties :

- L'établissement du terme source (l'émission de benzène)
- La modélisation de la dispersion des émissions de benzène

II. Etablissement du terme source :

L'émission d'hydrocarbure dans le cas d'un écoulement liquide est dépendant de plusieurs paramètres dont les quantités mises en jeu, l'étendue de la flaque, des effets de la météorologie et dans ce cas, la présence ou non d'un tapis de mousse modifiant l'interface d'émission, i.e. la surface d'hydrocarbure en contact avec l'air. Autrement dit, il n'existe pas de facteur d'émission établi pour ce cas complexe.

Le présent travail va essayer de concilier les paramètres influant dans le cas modèle d'une flaque d'hydrocarbure à l'air libre avec des concentrations mesurées dans l'air pour caler les effets de modification de l'interface hydrocarbure – air par l'ajout de mousse.

¹ *VGAI : valeur guide de qualité d'air comme une valeur numérique associée à un temps d'exposition correspondant à une concentration dans l'air d'une substance chimique en dessous de laquelle aucun effet sanitaire ou (dans le cas de composés odorants) aucune nuisance ou aucun effet indirect important sur la santé n'est en principe attendu pour la population générale. – AFSSET et CSTB*

II.1. Chronologie des évènements pour établir une estimation du débit d'hydrocarbures : hypothèse de modélisation

Le début de la fuite sur le bac d'essence P551 n'est pas connu exactement car celui-ci était en vidange (chargement bateau).

La seule information est une ronde vers 17 h dans la zone ne mettant pas en évidence la fuite, et pas de ressenti d'odeur / visu d'essence.

Par suite de ressentis d'odeur d'essence hors de la raffinerie, la recherche de fuite a été enclenchée. L'identification de la zone d'émission a eu lieu vers 19h30.

La mise en place de mousse incendie sur la nappe et d'eau a rapidement été activée. Le tapis de mousse est confirmé comme complètement déployé dès 20 h 07, ce qui a modifié l'évaporation des hydrocarbures.

Il a été rapidement identifié une difficulté de maintenir un tapis de mousse couvrant compte tenu du fort vent et on peut supposer un mélange ou une dilution de la mousse dans l'essence. La décision de renouvellement de la mousse s'est effectuée sur constat visuel ou sur mesure PID par le service sécurité.

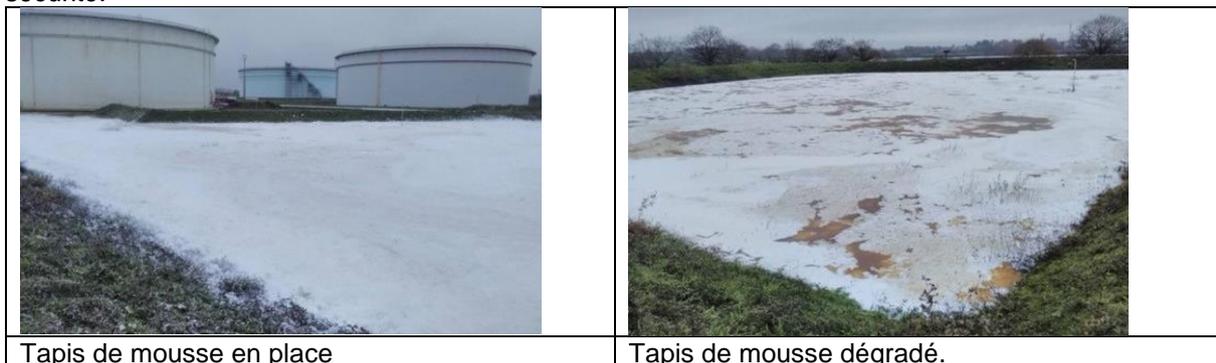


Figure 1 : Photos du tapis de mousse

De la suite de ces évènements, nous retiendrons comme hypothèse d'émission pour la modélisation les trois grandes étapes décrites ci-dessous.

A- DEBUT FUITE supposé : 21/12/2022 17 H

L'étendue de la nappe d'hydrocarbure a été estimée par la raffinerie sur la base du volume de fuite et de pente de la cuvette. Le débit de fuite moyen : $55 \text{ m}^3 / \text{h}$ (770 m^3 au total du 21/12 à 17h au 22/12 à 7h).

L'émission d'hydrocarbure est constituée d'une part par le flash au point de fuite et d'autre part, par l'émission de la flaque d'hydrocarbure à l'air libre.

Pour cette période, aucune mesure de concentration de benzène dans l'air n'est disponible autre que des mesures de COV dans le site en toute fin de période, le premier canister installé par les pompiers n'est en place qu'à partir de 23h40 le 21/12.

Il n'est donc aucune autre solution que d'extrapoler l'émission à partir des règles d'entraînement des hydrocarbures avec une formule de calcul de type nappe d'hydrocarbure. Les paramètres d'influence sont la surface, la longueur, la vitesse du vent, la température et les spécificités de la molécule de benzène (tension de vapeur, teneur dans le mélange ...).

B- Fuite et MODIFICATION ENTRAINEMENT DES HC : du 21/12/2022 à 20 H au 22/12/2022 à 7 h

L'émission d'hydrocarbure est toujours constituée d'un flash au point de fuite et d'autre part, l'émission de la flaque mais pas toujours à l'air libre.

La mise en place d'une mousse en surface réduit la capacité d'échange entre la nappe d'hydrocarbure et l'air. Le tapis de mousse a été complètement mis en place dès 20h07, et il a fallu l'entretenir.

La question est de savoir de combien ce tapis de mousse a réduit les émissions de COV dont le benzène. Il n'existe pas de formule de calcul, des hypothèses sont donc faites en s'aidant des mesures sous le vent de la nappe. Un facteur de stabilité du tapis de mousse durant la période devra être proposé.

C-MODIFICATION ENTRAINEMENT DES HC : 22/12/2022 à 7 H au 28/12/2022 à 7 H

Le bac ne fuit plus, l'émission est constituée de l'émission de la flaque d'hydrocarbure avec couverture de mousse régulièrement entretenue du fait des conditions climatiques mais dont l'efficacité a pu varier au cours du temps. La fin de l'évènement et des opérations de nettoyage / pompage est le 28/12/2022 vers 7 h du matin.

II.2. Etablissement des paramètres nécessaires au calcul de l'émission

Pour le début de la fuite, une formule d'évaporation de nappe est applicable, parmi les formules disponibles, nous retenons comme première approche la formulation préconisée dans l'étude réalisée par l'INERIS (DRA-14-126457-12536A Évaporation de nappes multi-constituants : rapport d'interprétation des essais en laboratoire et en galerie 12/12/2014).

- pour un mélange :

$$q_{ev\ i} = K \times S \times U_h^m \times L^{-n} \times Sc_i^{-p} \times \frac{P_{v_i} \times M_i}{R \times T_p} \times \left(\frac{P_a}{P_{v_i}} \ln \frac{P_a}{P_a - P_{v_i}} \right)^q$$

$$q_{ev} = \sum_{i=1}^n q_{ev\ i}$$

q_{ev} Débit d'évaporation en (kg/s)

$q_{ev\ i}$ Débit d'évaporation du composé i (kg/s)

K coefficient

S surface de la nappe (m^2)

Dans la plupart des corrélations la nappe est supposée être circulaire, ainsi :

$$S = \pi \times r^2$$

L Longueur caractéristique dans le sens de l'écoulement d'air (m)

$$L = 2 \times r \text{ (nappe circulaire)}$$

r rayon de la nappe

U_h vitesse du vent à la hauteur h (m/s)

Sc nombre de Schmidt (-)

P_v pression de vapeur saturante (Pa) à T_p

P_{v_i} pression partielle du composé i au dessus de la nappe (Pa)

P_a pression atmosphérique (Pa)

M masse molaire (kg/mol)

R constante de Boltzmann (=8,314 J/mol.K)

T_p température de la nappe (K)

m, n, p constantes

q constante (=0 ou 1)

Il est également rappelé que, pour appliquer ces formules, il est nécessaire de supposer que les essences sont assimilées à des mélanges « idéaux » en négligeant les composés oxygénés, ce qui est valable dans le cas de la composition de l'essence FCC présente dans le bac P551.

Le choix des différents paramètres est décrit dans les différentes sections suivantes.

A partir de l'intervention pompier, il ne s'agira plus d'une flaque d'hydrocarbure « classique », il faudra prendre en compte les changements de la surface d'évaporation inhérents à la présence de mousse.

II.2.1. Composition de l'essence :

L'analyse laboratoire de l'essence FCC réalisée le 19/12/2022 par la méthode PONA (voir Annexe 1) donne une composition de 0,88 % massique en benzène. La fraction molaire en benzène dans le liquide est de 1,04 %. La densité de cette essence est de 742 kg/m³.

Comme des analyses de spéciation de COV ont été réalisées dans l'environnement à partir de canister et d'analyseur BTEX, il est également intéressant de reporter d'autres constituants identifiables, tels que les alcanes en C4 (butane & isobutane : 5,74 % massique et 9,2 % molaire), le toluène (7,28 % massique et 7,36 % molaire) et la somme des xylènes et éthylbenzène (10,16 % massique et 8,91 % molaire).

Les familles de constituants sont reportées dans le tableau suivant avec si possible l'espèce chimique correspondante.

C	nr	Naphtènes = alcane cyclique non aromatique	Paraffines = alcanes	Cyclo Oéfine = alcène cyclique.	Olefine = alcène	Aromatique	Other	total % massique	total % molaire
3			propane 0,02					0,02	0,04
4			butane & isobutane 5,74	9,2				6,38	10,34
5			pentane + ... 2,81		0,1			5,52	7,48
6		cyclo pentane 0,07	hexane + ... 6,77		1,67			18,66	21,14
7					2,23			29,15	28,36
8									
9									
10									
11									
12+									
Poly									
total		13,08	34,89		5,43		18,96	27,64	100

Tableau 1 : composition de l'essence avec attribution d'espèce chimique

Pour rappel, la représentation de la localisation des analyses canisters (horaire et concentration en benzène) est reportée sur la figure suivante. Une comparaison complète entre l'analyse des COV des canisters et l'émission demanderait de prendre en compte les conditions de dispersion atmosphérique et la variabilité de l'émission. Dans un premier temps, il est possible de suivre sous forme de ratio l'évolution des espèces entre elles pour évaluer l'évolution de la composition de l'essence au cours du temps.

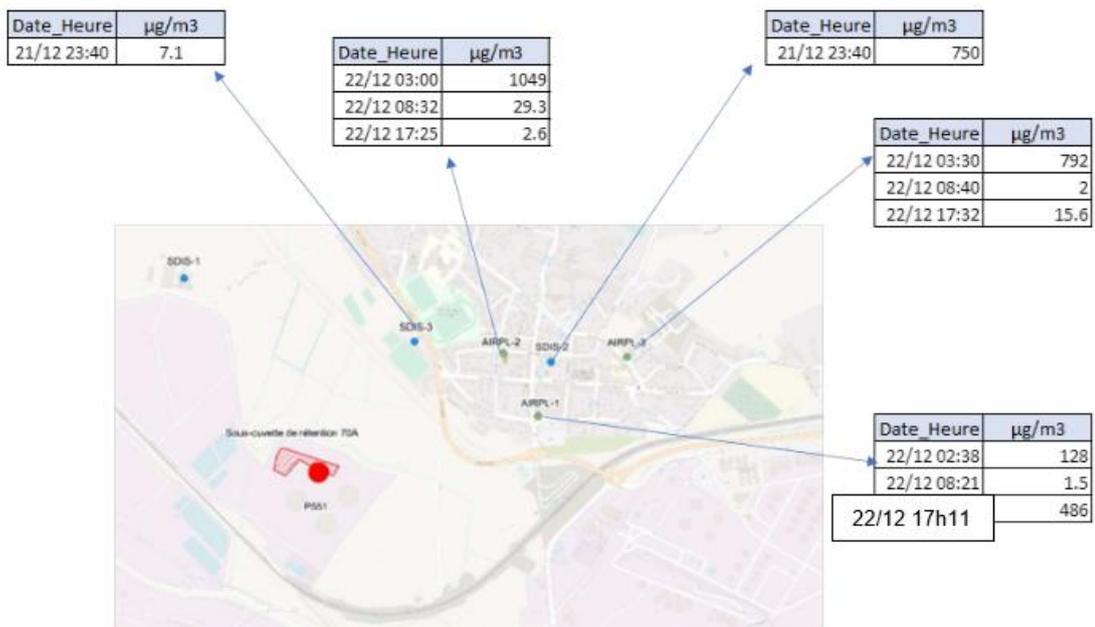


Figure 2 : suivi des teneurs en benzène dans les canisters

Dans les figures suivantes sont reportées les éléments de comparaison entre les ratios obtenus entre un COV spécifique et le benzène dans les analyses canisters jugées représentatives du panache.

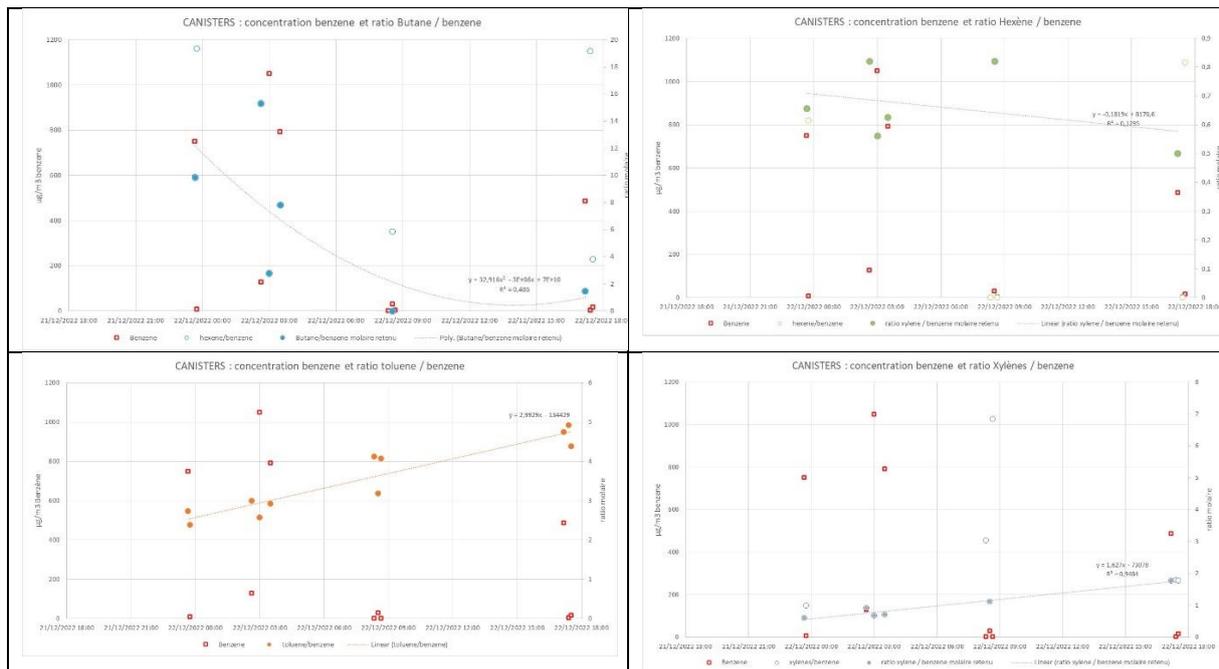


Figure 3 : suivi des ratios dans les canisters

Il ressort que, en normalisant par la concentration de benzène, le ratio molaire (espèce *i* / Benzène) évolue en fonction du temps :

- Pour les alcanes légers (butane) :
 - Le ratio suit une rapide décroissance, type exponentiel pour rapidement être proche de zéro (dès la fin de la fuite d'essence vers 22/12 à 7 h).
 - Durant la phase de fuite, sur les canisters avec une concentration de benzène significative, le ratio varie sur une large plage (ratio de 2 à 15). Cela indique une forte hétérogénéité de la source d'émission pour le butane entre le flash à la fuite et le long de la flaque comparativement au benzène.
 - L'analyse canister du 22/12 matin avec une concentration de benzène significative ne présente presque plus de butane. La présence de butane ensuite devrait être corrigée du bruit de fond et d'autres émissions locales.
- Pour les alcènes (hexène-1) :
 - Le ratio avec le benzène fluctue entre 0,5 et 0,8.
 - L'émission d'hexène semble plus corrélée avec celle de benzène que ne l'est le butane.
- Pour les aromatiques (toluène) :
 - Le ratio évolue de façon quasi linéaire passant de 2,5 à 5 au 22/12 vers 18 H.
 - L'émission de toluène suit assez bien l'émission de benzène, et on observe un appauvrissement relativement plus rapide du benzène.

- Au-delà par comparaison avec les analyses BTEX, la décroissance continue
- Pour les aromatiques plus lourds (xylènes) :
 - La présence d'autres sources potentielles entraîne des proportions non logiques pour les canisters à faible concentration de benzène, ces valeurs sont à exclure.
 - Le ratio évolue de façon quasi linéaire passant de 0,6 à 2 pour les canisters avec des teneurs en benzène significatives.
 - L'émission de xylène suit également assez bien l'émission de benzène, et on observe un appauvrissement relativement plus rapide du benzène.

Le suivi plus long terme avec l'analyseur BTEX sur la remorque déployée par Air Pays de Loire au niveau du stade illustre une décroissance relative du ratio benzène versus les autres aromatiques, mais il est à noter que :

- Les ratios sont plus bruités car vraisemblablement la mesure de benzène et de l'HCT ne sont pas exactement sur les mêmes pas de temps (HCT moyenne ¼ h en alternance avec mesure Méthane, Benzène dans analyseur Chromato par échantillonnage de 1080 secondes par ¼ h et il ne s'agit plus de la même mesure d'HCT (équivalent Carbone sur base étalon CH4 – Propane et AIRPL n'a pas pu étalonner la voie Méthane compte tenu de l'urgence) que dans les canisters
- La contribution d'autres sources sans lien avec le déversement d'essence initial (notamment le trafic automobile), contribuent de plus en plus aux concentrations de benzène et d'aromatiques enregistrées, et il devient délicat d'extrapoler à partir des concentrations mesurées la contribution de la fuite d'essence.

Néanmoins, le ratio Benzène sur HCT reste dans la gamme de 2 % pour les pics supérieurs à 20 µg/m³ et évolue vers 1 % en fin de période. Le ratio Toluène sur Benzène évolue de 3 à 5.

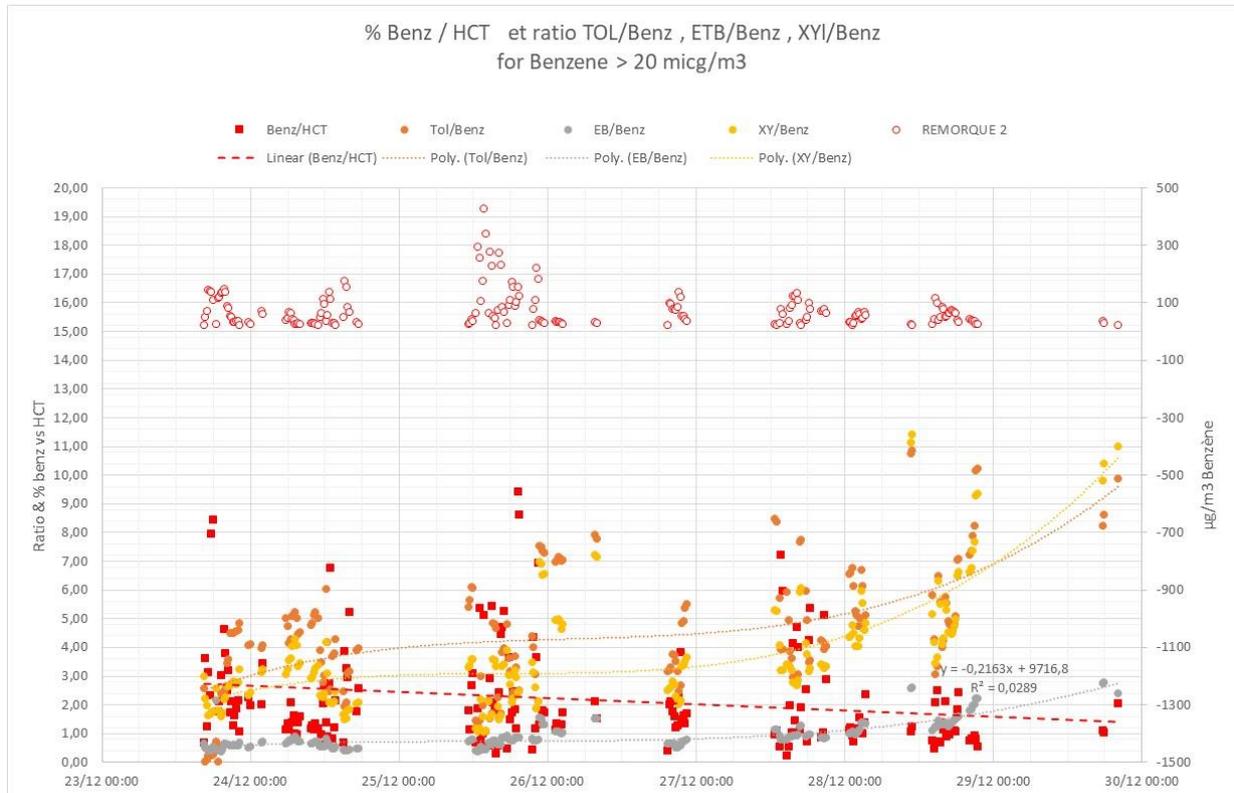


Figure 4 : suivi des ratios et de la teneur en benzène sur l'analyseur chromatographique de la Remorque

Concernant la composition de l'essence contenue dans la flaque, il faut donc intégrer une évolution lente de la proportion en benzène au cours du temps. L'essence perd rapidement ses alcanes légers, et la fraction de benzène diminue plus vite que les autres composés (toluène, xylènes et hexène), mais globalement dans l'air, la teneur en benzène représente environ 2 % en masse de COV réel (canister) ou HCT, donc on prend l'hypothèse qu'elle restera assez constante dans le liquide.

Volume et débit d'hydrocarbure écoulé

Par comparaison du bilan matière entre la quantité d'essence dans le bac P551 et les différents chargements, la quantité d'essence écoulée est estimée par la raffinerie à 770 m³.

A partir de l'évolution de la hauteur de liquide dans le bac et de la position et taille de la fuite, un calcul instantané du débit liquide a été fait par le service HSEQI (T. Campmas) de la raffinerie sur la base de la formule de Bernoulli.

- Les Hypothèses de Calcul sont :
 - Émission totale Q = 770 m³
 - H₀ (hauteur initiale) à T₀ (21/12/2022 17h) = 10,2 m
 - H₁ (hauteur finale) à T₁ (22/12/2022 7h) = 4,17 m

- Cela permet de déduire :
 - Alpha = $-1,20E-04$ m/s (vitesse verticale d'évolution du niveau dans le bac)
 - Surface fuite = $1,29E-03$ m² (déduite par itération pour obtenir la quantité totale de 770 m³ sur le temps de fuite connaissant les hauteurs initiales et finales) cela revient à un diamètre théorique de 40,6 mm environ.

$$\text{Calcul Débit} = \text{Surface fuite} * (2 * 9,81 * H_0 + 2 H_0 * H_1 * \text{temps} + \alpha^2)^{0,5}$$

Avec un début de fuite à 17 h le 21/12/2021 jusqu'au 22/12/2022 à 7 h, la fuite a duré 14 heures. Le débit moyen est de 55 m³/h, avec une décroissance de 65 m³/h initiale à 40 m³/h en fin d'écoulement. L'arrivée en benzène est maximale au début de la fuite (120 g/s) pour décroître linéairement vers 80 g/s en fin de fuite.

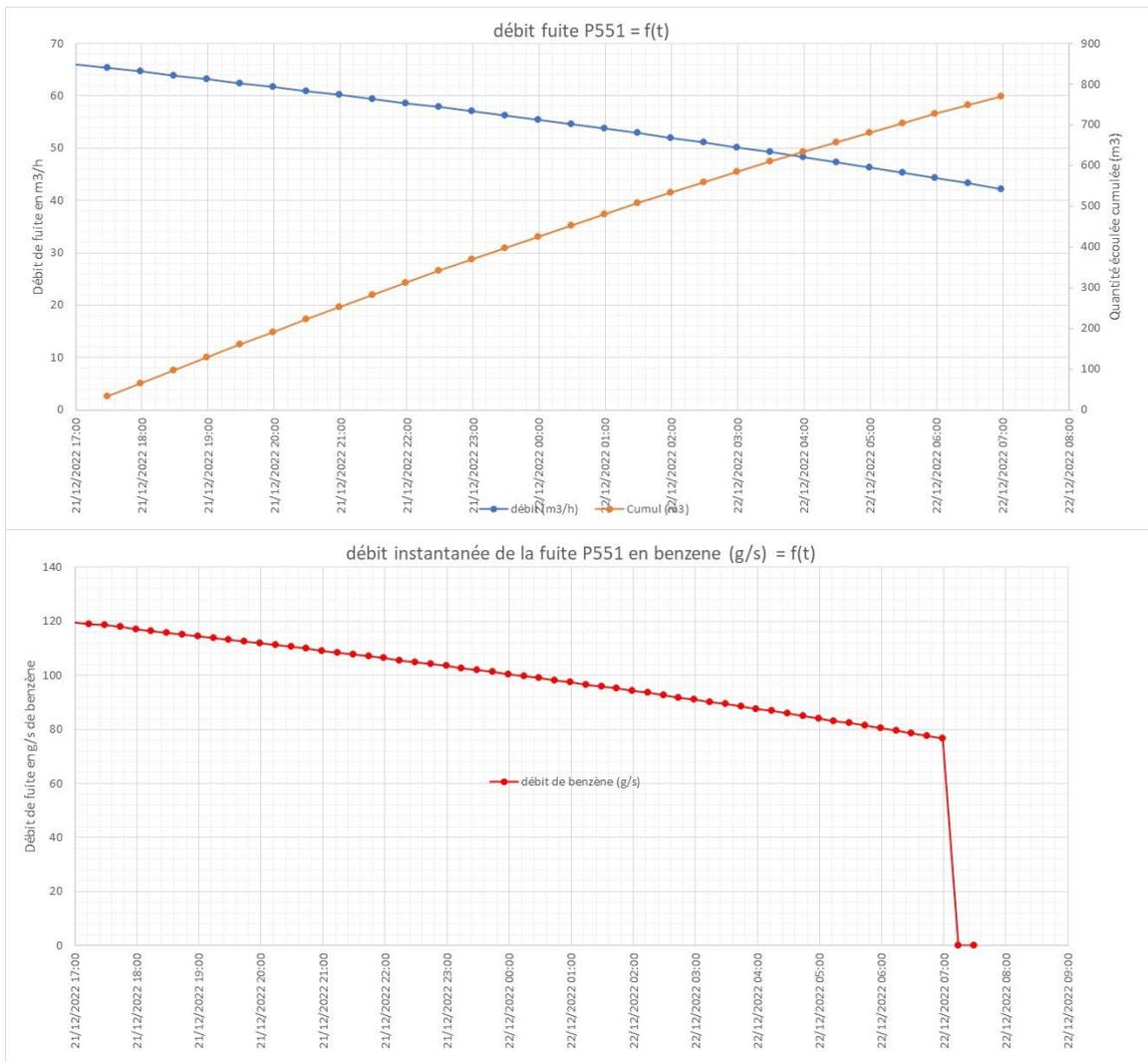


Figure 5 : débit de fuite liquide (essence et benzène)

II.2.2. Surface de la nappe :

Dans une cuvette idéale avec une surface parfaitement uniforme, il suffit de quelques mètres cubes pour couvrir uniformément l'entièreté de la surface de la cuvette. En revanche, la cuvette du P551 présente une variation de niveau du sol significative, ce qui amène préférentiellement la flaque de liquide sur la partie ouest. Le remplissage de la cuvette de rétention a été calculé par un géomètre par palier de 10 cm d'épaisseur de liquide. L'estimation de l'évolution de la surface en fonction du volume écoulé est reportée sur la figure suivante.

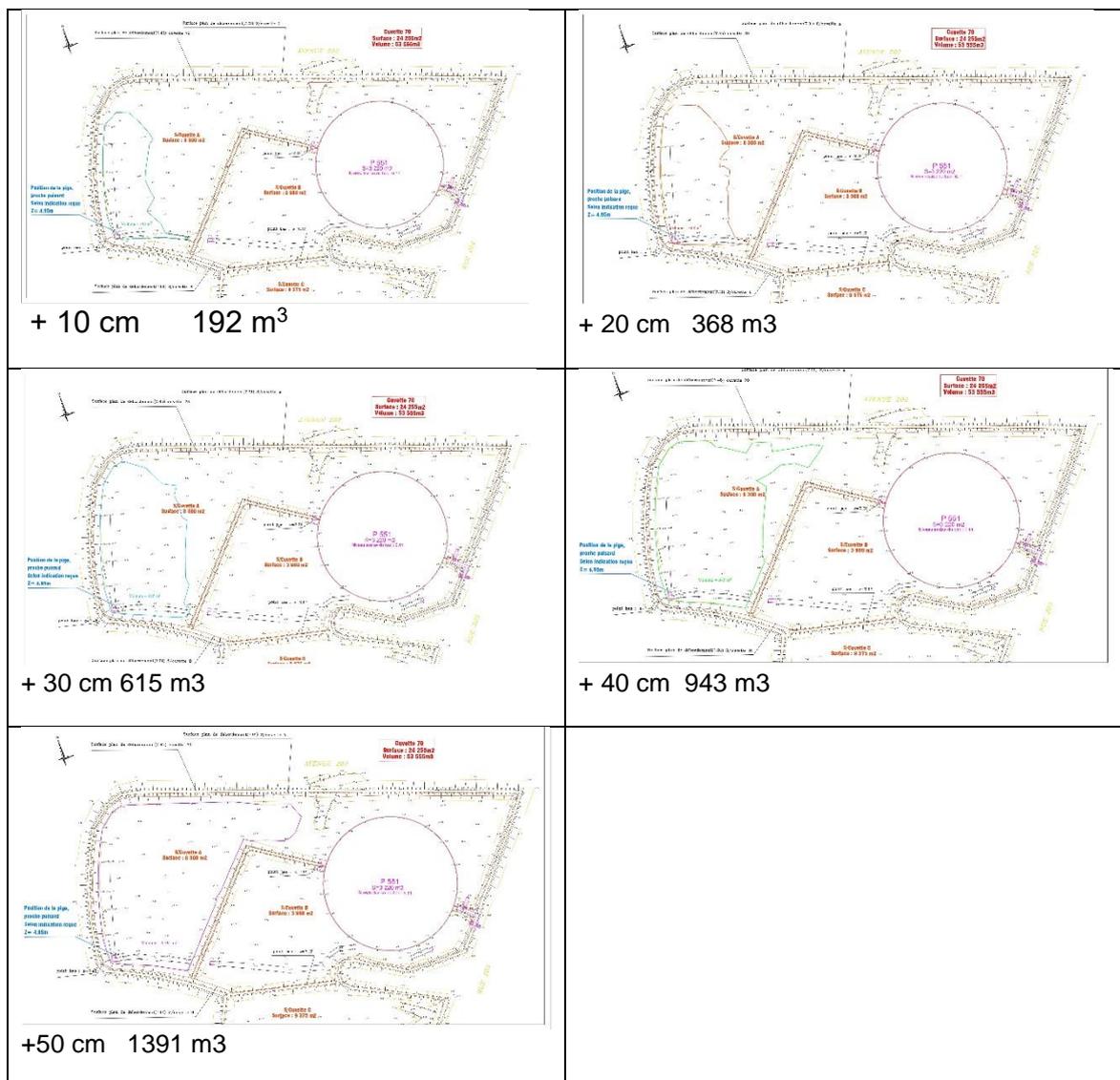


Figure 6 : Evaluation de la surface d'hydrocarbure en fonction du volume écoulé et de l'altimétrie de la cuvette de rétention [source GEOTOPO].

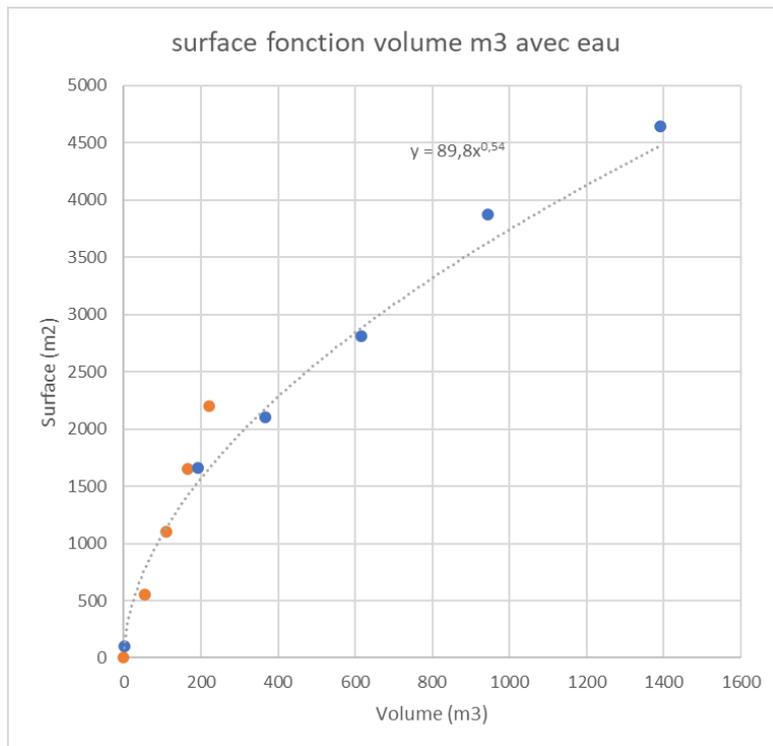


Figure 7 : estimation de la surface de la flaqué en fonction du volume d'essence écoulé (points bleus d'après calcul géomètre, points oranges par extrapolation linéaire de 0 à surface de 10 cm d'hydrocarbure)

Intervention pompier :

A partir de l'intervention des pompiers, de l'eau a été mise au fil du temps pour garantir le tapis de mousse. Le volume d'eau incendie ajouté au global est de : 2700 m³ et 88 m³ d'émulseur sur la durée de l'évènement.

Sur la base du suivi des appoints de mousse par le service sécurité, 50% de cette quantité sont déversés sur les 48h du début et le reste sur les jours restants.

Le débit de remplissage d'eau est pris de l'ordre de 0,5 m³ /min (30 m³ /h).

Si on considère que les pertes sont négligeables (passage dans le sol et évaporation) et en faisant l'hypothèse d'aucun mélange eau / hydrocarbure, la surface majorante est estimée en fonction du temps et suit la courbe bleue de la figure précédente.

Il est à noter que l'ajout des mousses, contenant certains des composés de stabilisation comme des surfactants, a pu favoriser une intégration d'eau à la phase hydrocarbure. Ce point sera négligé à ce stade, car il serait nécessaire de conduire des mesures spécifiques.

Des transferts vers un autre bac ont été commencé le 22/12 dès 17 h. Les opérations significatives de pompage ont eu lieu à partir du 24/12, ce qui a stabilisé le niveau.

Ce niveau maximal correspond à l'image de 1391 m³, qui est selon les observations, fidèle à la situation du 24/12 à 12h et n'est jamais monté au-delà de cette côte par la suite.

La figure suivante représente l'estimation de l'évolution de la surface en fonction du temps. La courbe noire montre la surface en fonction du temps uniquement pour les hydrocarbures, la courbe bleue prend en compte les HC et l'eau incendie ajoutée.

La surface maximale de la flaque d'essence surnageante est de l'ordre de 4500 m²

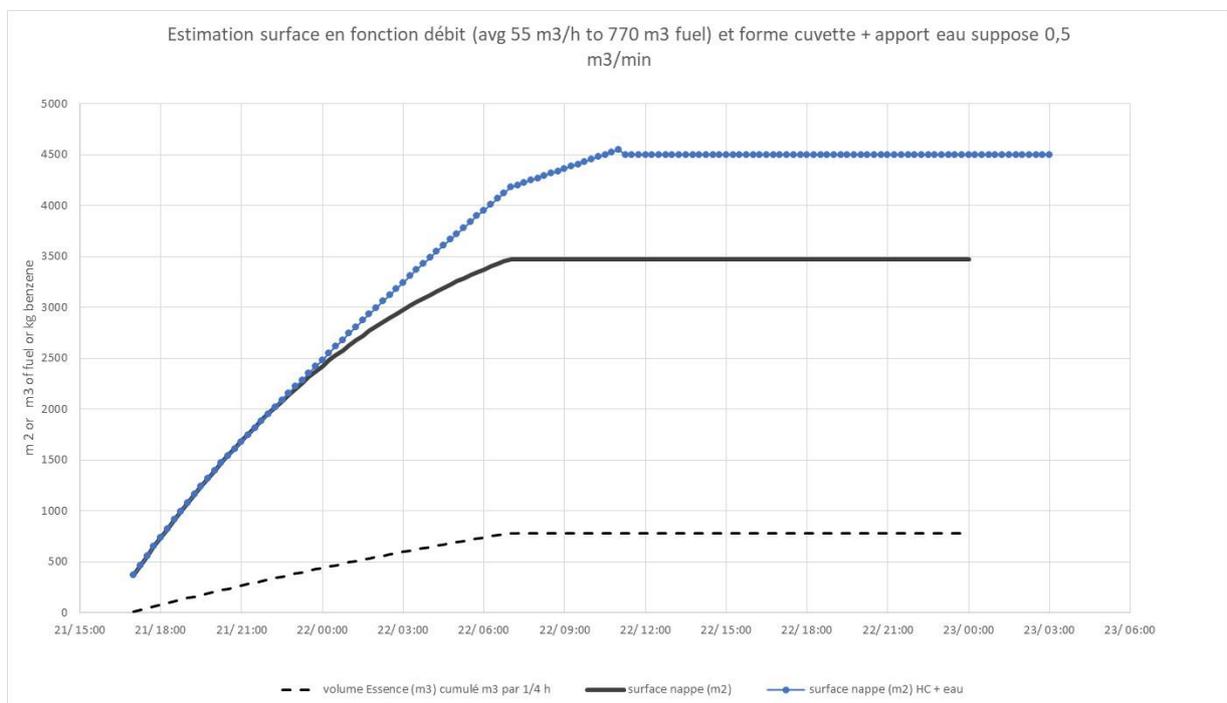


Figure 8 : évolution de la surface de la nappe en fonction du temps et de l'apport d'eau

Le relevé des actions pompier a été suivi dans les « minutes ». Les informations ont été synthétisées dans le graphique suivant avec un code couleur représentatif de l'état de la couverture.

Ce qu'il faut retenir, c'est que la mise en place de mousse a été réalisée à plusieurs reprises. La première action réalisée le 21/12 en soirée a dû être renouvelée pour maintenir une couverture efficace du fait de vent fort.

A partir du 22/12 vers 5 h du matin, 4 tapis de mousses successifs ont permis d'avoir une surface stable le 23/12 vers 9h30.

Le tapis de mousse sera ensuite maintenu régulièrement par des ajouts successifs.

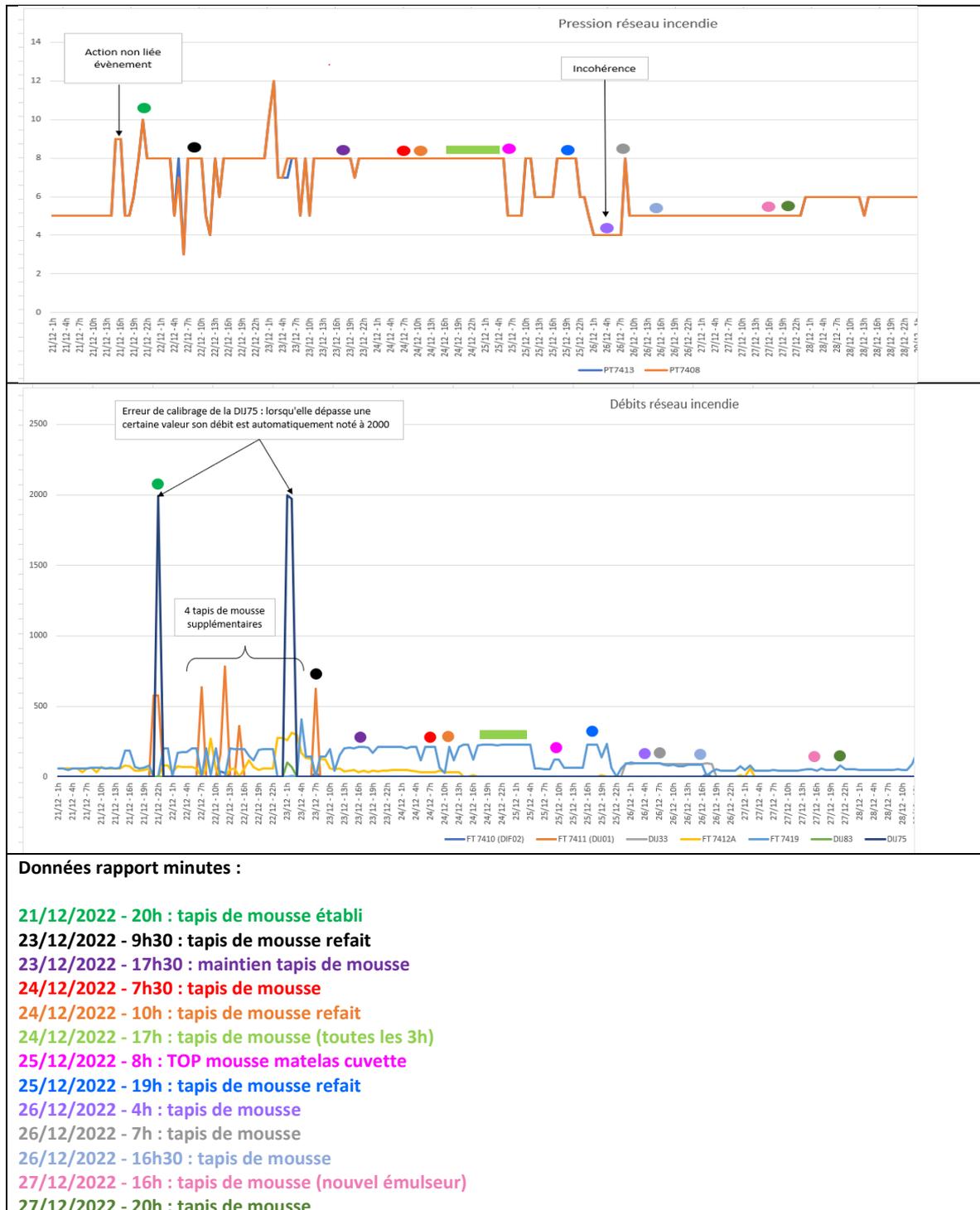


Figure 9 : relevé des actions des pompiers pour la mise en place et entretien tapis mousse

II.2.3. Estimation du débit d'émission par calcul de flaque en fonction du temps

Représentation du calcul d'émission de la flaque

Dans une première approche, nous utiliserons le calcul avec la formule INERIS de la flaque appliquée à notre cas avec comme hypothèse que l'essence garde toujours une teneur de 0,88 % massique car le ratio benzène dans les analyses d'air reste assez constant (environ 2 % sur toute la période, canister et analyseur BTEX / HCT).

Le calcul du taux de benzène émis et résiduel est présenté sans tenir compte de la présence ou l'absence de mousse, seule la force du vent varie (température fixée à 10 °C pour le calcul de la pression de vapeur saturante du benzène, pas de prise en compte d'action de brassage potentiel par les tentatives de pompage ou d'apport d'eau / mousse).

La vitesse au-dessus de la flaque (U_1) est estimée à partir de la mesure du mat météorologique de 18,1 mètres, à partir de la vitesse de friction et de la longueur de Monin Obukov déterminées par le modèle ADMS par ¼ d'heure.

La relation retenue est celle applicable en condition neutre et stable [Vendel 2011²].

Par comparaison avec la formule de Griffin, il faudrait une rugosité de l'ordre de $R = 0.005$ m avec cette formule, soit des obstacles inférieurs à 10 cm qui sur le principe est acceptable pour une nappe liquide de grande étendue. Il est cependant à noter que l'établissement de la vitesse de frottement en surface ne modifie pas instantanément le vent au-dessus d'une nappe. Le profil en amont de la cuvette est plus proche d'un profil de rugosité de 0,1 à 0,2 m, il faudra quelques dizaines de mètres, voire plus compte tenu de la présence de merlon pour établir cette forte vitesse de frottement. Sans compter que la nappe elle-même crée sa propre stabilité en cas de forte évaporation.

$$U(z) = u^* / 0,4 (\ln(z/rugo) + 5 * z/Lmo)$$

La vitesse d'entraînement (U_1) est un facteur de premier ordre influençant l'émission et sa variation en fonction du temps. Le détail et la justification de l'ensemble des paramètres retenus est fourni en annexe ainsi que des tests complémentaires avec différentes rugosités.

² Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels par Florian Vendel, CIFRE Total – LMFA, 2011

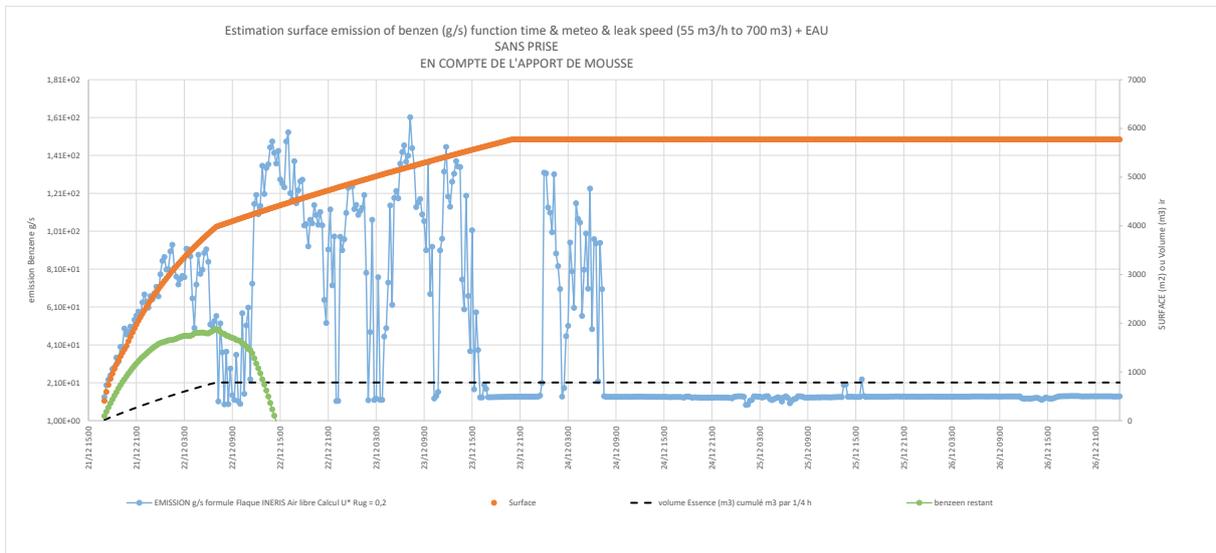


Figure 10 : Emission de benzène calculée par la formule de la flaque et estimation de la quantité de benzène restante (rugosité 0,2 m)

Il ressort que l'utilisation de la formule d'une flaque d'hydrocarbure conduit rapidement à une émission supérieure à l'arrivée de benzène et sans contrôle de la formule, l'ensemble du benzène serait évaporé dès le 22/12/2023 à 15 heures avec la surface initiale limitée : **ce qui n'est pas compatible avec ce qui a été constaté.**

Remarque : La formulation de la flaque d'hydrocarbure ne prend pas en compte les actions des pompiers pour réduire le risque d'incendie et d'émission avec l'apport de mousse. 1 cm de mousse anti incendie peut réduire de plus de 97 % les émissions de COV durant plus de 2 heures (d'après VAPOUR SUPPRESSION OF n-HEPTANE WITH FIRE FIGHTING FOAMS USING LABORATORY FLUX CHAMBER, T.H. Schaefer & all, International Association for Fire Safety Science).

En fonction de l'épaisseur et de la porosité de la mousse, le modèle d'entraînement sera corrélable avec un modèle de flaque avec un facteur de porosité équivalent à une diminution de la surface d'échange. Cependant, à partir d'une épaisseur de mousse suffisante, l'entraînement par le vent n'est plus le facteur limitant comme dans le modèle de flaque, mais le transfert de l'hydrocarbure gazeux au travers de la mousse.

L'objectif de l'étude n'étant pas de connaître exactement l'émission mais avec une émission réaliste de simuler les concentrations de benzène dans l'air en fonction du temps et du lieu sur le bourg de Donges en accord avec les mesures, le choix a été pris de « caler » un modèle de dispersion avec des émissions estimées sur les concentrations enregistrées.

Pour affiner, il faut confronter aux mesures dans l'environnement. Les premières analyses sur l'air sous le vent de la nappe la plus fraîche sont vers minuit, soit après l'intervention des pompiers et la présence d'un premier film de mousse assez dégradé.

Ensuite, l'ajout et le maintien de tapis de mousse va être calé en fonction des mesures dans l'air (canisters et tube passif puis analyseur remorque mobile à partir du 23/12 17 H) par un facteur d'efficacité pour le matelas de mousse entretenu.

L'utilisation d'un modèle de dispersion est nécessaire pour confronter les concentrations analysées avec les concentrations simulées.

Le modèle gaussien ADMS5.2 du CERC (puis ADMS6 pour les évaluations de scénarios alternatifs) a été retenu car il est couramment utilisé pour les études d'impact sanitaire.

Paramétrisation du modèle de dispersion :

En amont de la raffinerie, les vents passent sur l'estuaire et dans l'axe impactant (vent d'origine sud - sud-ouest), la raffinerie ne présente que des obstacles espacés. La fuite d'hydrocarbure se situe dans la raffinerie à l'intérieur d'une cuvette de rétention. Les panaches sont entraînés en fonction du vent vers les habitations au Nord / Nord Est en passant au-dessus du Marais de Liberge.

Les émissions venant du sol vont donc se retrouver rapidement au-dessus d'une surface d'eau avant d'atteindre la ville. La majorité des mesures (canisters et remorque) est réalisée à 500 – 800 mètres de la zone d'émission avec les 500 premiers mètres du parcours au-dessus de surface en eau puis de zones peux rugueuses (route, prairies ...).

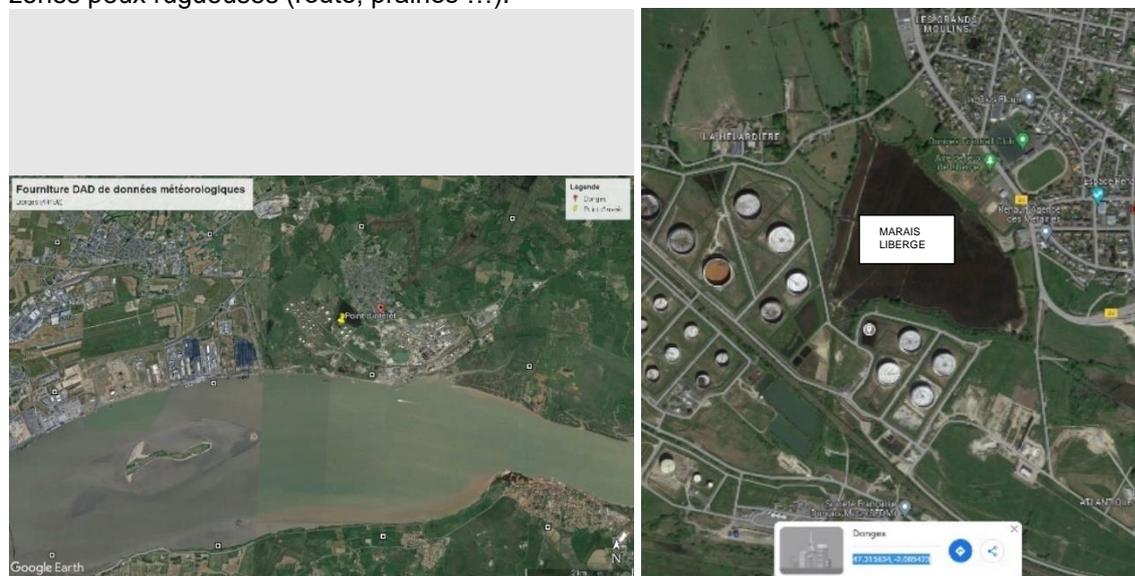


Figure 11 : Visualisation de la zone d'étude (Remarque : le marais de Liberge est mal nommé sous Google)

La figure suivante reporte les analyses benzène (canister et remorque) ainsi que les données météorologiques mesurées sur zone (mât raffinerie et mât Montoir De Bretagne). Les mesures de direction entre la station de la raffinerie et Montoir sont très proches, en revanche la vitesse mesurée

sur la raffinerie est plus faible voire pratiquement nulle du 24/12 au 27/12. Du point de vue technique, aucune erreur n'apparaît pour ces vents faibles sur la mesure.

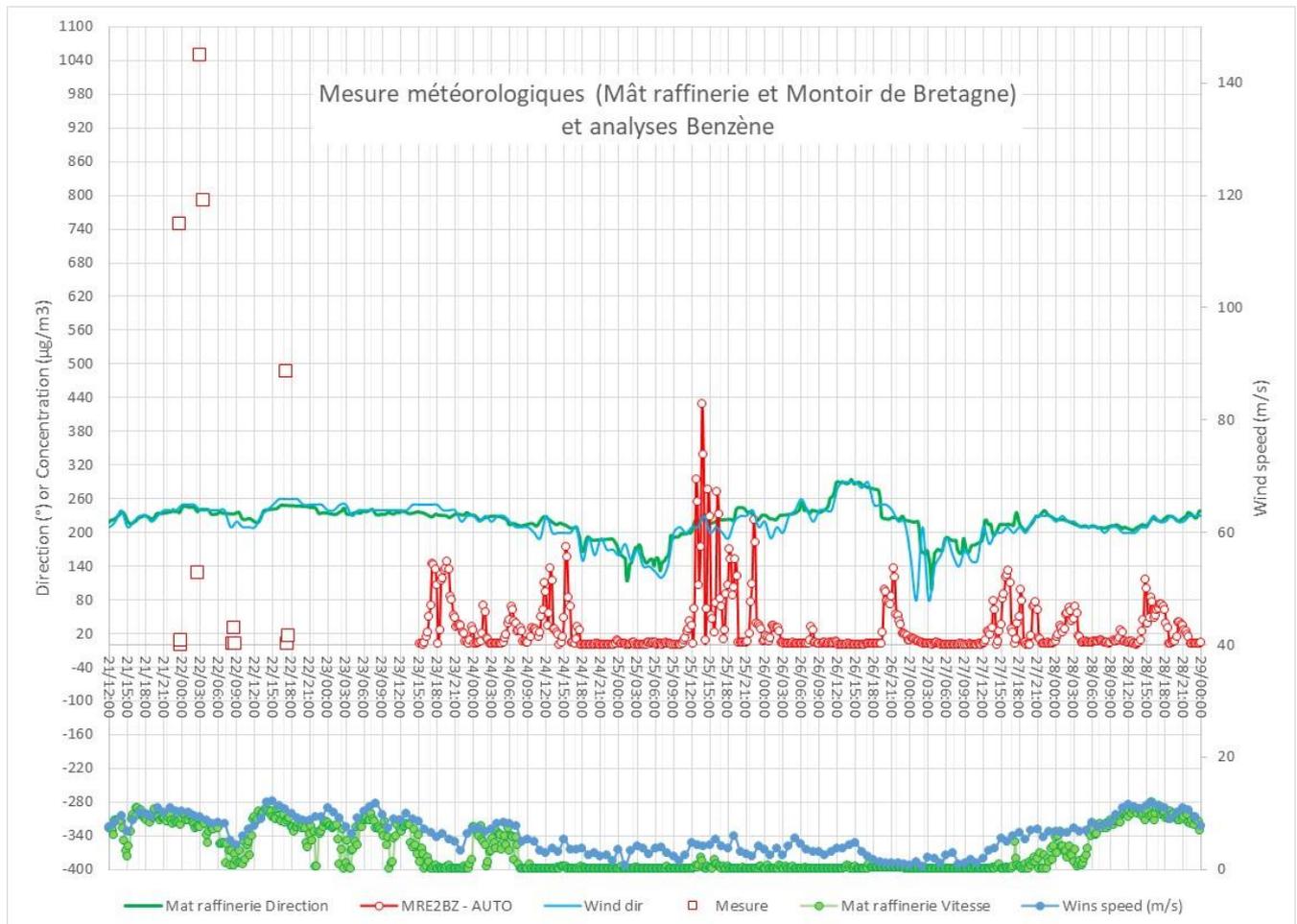


Figure 12 : Suivi des données météorologiques entre la station de Montoir de Bretagne et de la raffinerie, et concentration en benzène.

Pour conduire les calculs de dispersion, les informations météorologiques d'entrée retenues sont issues de la station météorologique de la raffinerie plus représentative de la zone de la flaque au pas du ¼ d'heure (voir annexe station météorologique), complétées par les informations de nébulosité de Montoir de Bretagne (presque toujours 8 octas sur la période).

Le point le plus distant est le canister APL3 à 1100 mètres avec plus de parcours en ville. L'écoulement à travers les rues n'est pas modélisable par cette version d'ADMS. On gardera donc une rugosité modérée sur la ville pour majorer les concentrations et coller aux observations faites dans les rues.

Méthodologie d'estimation de l'émission par Reverse Dispersion Modeling (RDM).

Le principe est de disperser une quantité fixée a priori et de corriger la valeur d'émission par un ratio entre la concentration mesurée par rapport à la concentration simulée.

Emission réelle = Emission a priori * concentration mesurée / concentration simulée.

La quantité fixée a priori est prise avec l'hypothèse majorante que tout le benzène est émis à l'atmosphère en 24 h. Soit les 770 m³ d'essence de densité 742 kg/m³ à 0,88 % massique vont apporter 5028 kg de benzène. Si l'ensemble est émis en 24 h, l'émission instantanée serait de 58,2 g/s.

Pour l'émission a priori on prendra 50 g/s.

Pour reproduire la concentration a priori dans le canister, une modélisation a été conduite sur la demi-heure d'ouverture du canister par des calculs de concentration ¼ horaire.

Pour comparer mesure et simulation, trois aspects doivent être pris en compte :

- les données d'entrée du modèle (représentation de la source, météo, prise en compte du relief, rugosité ...) ;
- la capacité du modèle à prendre en compte certains phénomènes, comme le réseau de rues qui n'est pas géré dans la version de ADMS utilisée;
- les incertitudes, avec notamment la comparaison à une valeur en un point fixe, la direction du vent est le premier facteur de déplacement latéral du cœur du panache (zone la plus concentrée). Selon l'étalement du panache, l'écart de concentration entre le bord ou le cœur du panache peut varier d'un facteur 10 en quelques dizaines de mètres.

Compte tenu de l'incertitude inhérente à l'approche RDM sur un point, une méthodologie de prise en compte de l'incertitude a été retenue pour affiner cette valeur (description détaillée en Annexe Canister).

Le tableau suivant regroupe les estimations d'émission pour les analyses canisters dans le panache, les canisters à moins de 10 µg/m³ sont trop susceptibles d'être influencés par des émissions locales.

D'après les analyses canisters de la nuit du 21 au 22/12, en cas de tapis dégradé les émissions estimées par RDM sont de l'ordre de 60 à 140 g/s selon le canister.

Après la mise en place du second tapis (22/12 matin vers 6 h), aucune concentration significative de benzène n'est enregistrée. Vers 17 H, deux canisters pris quasi simultanément sont exploitables. Par contre, l'émission estimée varie d'un facteur 20 entre les deux. L'hypothèse la plus réaliste est de prendre en compte une valeur moyenne car il s'agit vraisemblablement d'une bouffée induisant une forte concentration en périphérie de Donges mais n'entraînant pas d'impact sur la ville. Ce qui est cohérent avec les actions de pompage et transfert débuté dans cette période de temps et difficile à retracer.

code	indice	date début	Concentration Benzène Mesurée	RDM emission gs-1 BORNE HAUTE	RDM emission gs-1 BORNE MEAN	RDM emission gs-1 BORNE MIN
SDIS-1		21/12/2022 23:50	1			
SDIS-2		21/12/2022 23:40	750	112	103	94
SDIS-3		21/12/2022 23:45	7,1			
AIRPL-1	-1	22/12/2022 02:38	128	68	59	50
AIRPL-2	-1	22/12/2022 03:00	1049	112	106	100
AIRPL-3	-1	22/12/2022 03:30	792	143,9	136,45	129
AIRPL-1	-2	22/12/2022 08:21	1,5	-		
AIRPL-2	-2	22/12/2022 08:32	29,3	0,26	0,2	0,14
AIRPL-3	-2	22/12/2022 08:40	2	-		
AIRPL-1	-3	22/12/2022 17:11	486	69	66,5	64
AIRPL-2	-3	22/12/2022 17:25	2,6	-		
AIRPL-3	-3	22/12/2022 17:32	15,6	3	2,95	2,9

Tableau 2 : estimation de l'émission de benzène pour les différents canisters (tapis dégradé : orange ; tapis en bon état : vert)

Pour pouvoir extrapoler l'évolution de l'émission en fonction de la journée, il a fallu relier ces mesures discontinues (en espace et en temps) par une fonction d'évolution prenant en compte les paramètres susceptibles d'influencer l'émission (surface de la flaque, température, vitesse du vent, état de la mousse ...).

La fonction de normalisation retenue a été une fonction majorante correspondant à une nappe liquide constitué d'essence à composition de benzène constante, avec un calcul de la vitesse de vent avec une rugosité faible (0,005 m) comme préconisée par l'INERIS.

Le calage de la fonction s'effectue à partir des estimations d'émissions obtenues par RDM pour les différentes séries de canisters :

- La série de canister à forte concentration de la nuit du 21/12 au 22/12 a servi pour établir un facteur d'état du « tapis dégradé », soit en moyenne 50 % de réduction par rapport à une flaque à l'air libre, et descendant à moins de 35 % de réduction après deux heures du matin (AIRL3.1)
- La série de canister à plus de 10 µg/m³ après la mise du second tapis a permis d'établir un facteur d'état du type « tapis en bon état », soit en moyenne 90 % si on considère AIRL1.3 comme plus lié à une opération ponctuelle (bouffée).

L'évolution des informations des actions pompiers ont permis d'appliquer ce facteur d'état pour réduire l'émission de benzène par rapport à une flaque à l'air libre.

Le graphique reprend les émissions estimées avec comme courbe en gris modèle de flaque à l'air libre et une rugosité de 0,005 m, en point jaune l'émission calculée par le modèle de flaque avec un tapis dégradé, en point vert l'émission calculée par le modèle de flaque avec un tapis récent, en carreau jaune l'émission estimée retenue, en carreau bleu l'estimation minimale de l'émission depuis le canister, en carreau blanc, l'estimation maximale de l'émission depuis le canister, points rouges = mesure benzène en µg/m³ par canister.

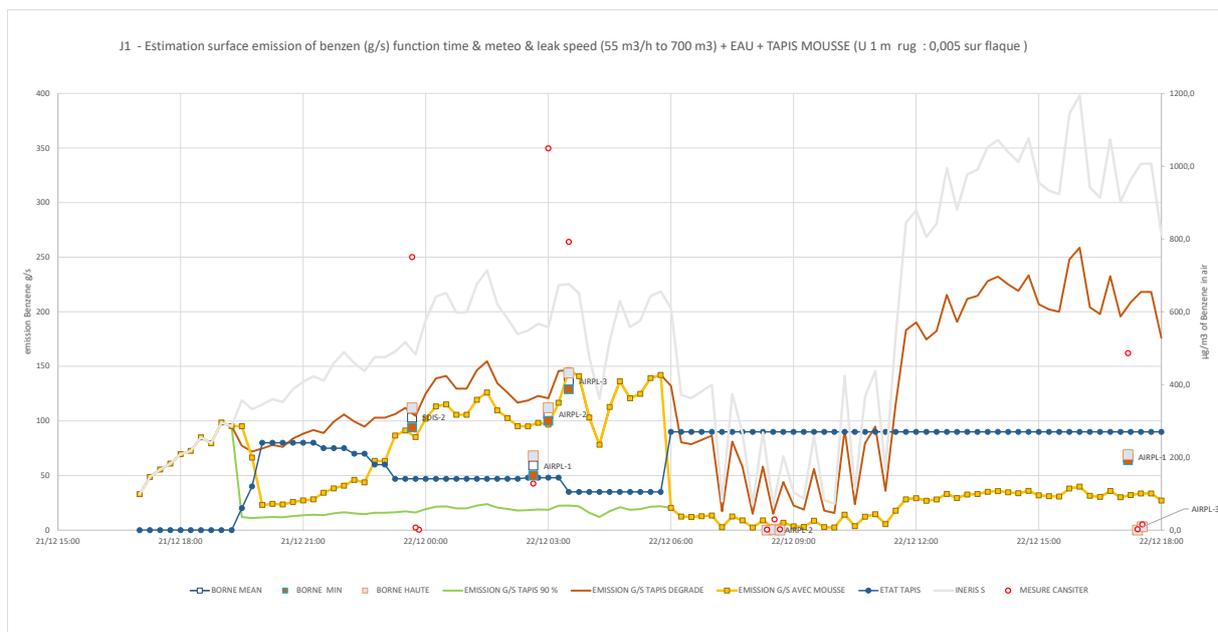


Figure 13 : évolution de l'émission et valeurs canisters J01 cas avec calcul de rugosité $r=0,005$ m. EMISSION J01 CAS1 = 54 g/s

En se basant sur les canisters l'émission pour la première journée serait de l'ordre de 54 g/s en moyenne de benzène, soit la quasi-totalité du benzène écoulé du réservoir, ce qui semble excessif.

Compte tenu des incertitudes de l'approche, un recalage final a été appliqué par comparaison avec la mesure cumulée de benzène par tube passif sur l'école.

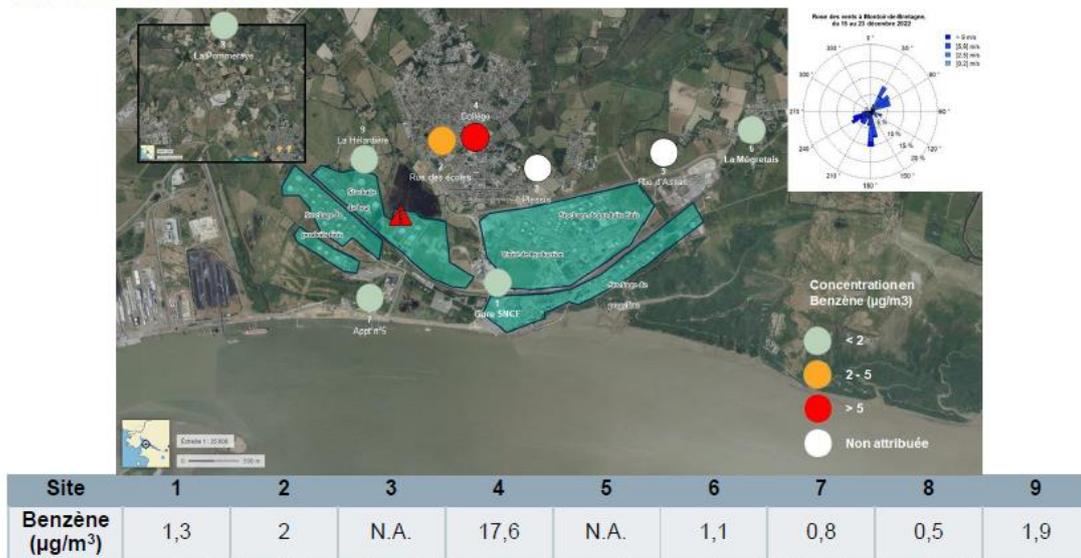
Dispersion pour la période du 22/12/2022 17h au 23/12/2022 16h : Comparaison au prélèvement par tube passif sur l'école

Confrontation aux analyses « long terme » représentative du flux global de benzène émis.

Le réseau Air Pays de Loire mesure par prélèvement passif sur une période de 8 jours les teneurs en benzène sur différents points de Donges.

Concentration extraite du rapport : *Evaluation des niveaux de COV, de métaux et d'acide cyanhydrique dans l'air Dans l'environnement de la raffinerie Total à Donges Campagne de mesure 2022, Air Pays de la Loire, mars 23*

Du 15 au 23 décembre



N.B. : cette semaine intègre 2 jours où une fuite d'essence a eu lieu sur le bac P551 de la zone des Magouëts, matérialisé sur la carte par un triangle rouge.

Figure 14 : Mesure tube passif Air Pays de Loire

Les mesures voisines (n°2) et (n°4 Collège) sont respectivement de 2 et 17,6 µg/m³. La distance entre ces deux points de la zone de fuite est de l'ordre de 1 – 1,1 kilomètre. Les deux points sont à moins de 400 mètres l'un de l'autre et la variation de la mesure en benzène (facteur env. 9) illustre l'incidence de la direction du vent sur les zones concernées.

Le tube de prélèvement situé au collège a été ouvert le 15/12/2022 à 15h10, puis refermé le 23/12/2022 à 15h55.

Sur les 8 jours de présence du 15 au 23/12, le tube aurait été exposé 2 jours avec une fin de prélèvement le 23/12 à 15H55. En supposant comme nulle la concentration hors évènement, cela donnerait comme ordre de grandeur une concentration moyenne sur ces deux jours pour le collège de : $17,6 * 8/2 = 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un cas réaliste en moyenne pour les deux jours.

Et si tout est émis en un jour, la concentration serait de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum pour la J01.

Avec la variation temporelle du cas à 54 g/s (Scénario 1), la concentration simulée sur l'école est de 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur la J01.

Il serait nécessaire de réduire à 35 g/s (Scénario 2) en moyenne pour obtenir la totalité du benzène en une journée, avec une moyenne du J01 simulée sur l'Ecole de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour conserver une contribution du benzène le J02, une émission de l'ordre de 20 g/s (Scénario 3) serait plus réaliste pour J01 avec une concentration simulée sur l'école de l'ordre de 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce qui laisserait pour J02, une émission de l'ordre de 10 g/s.

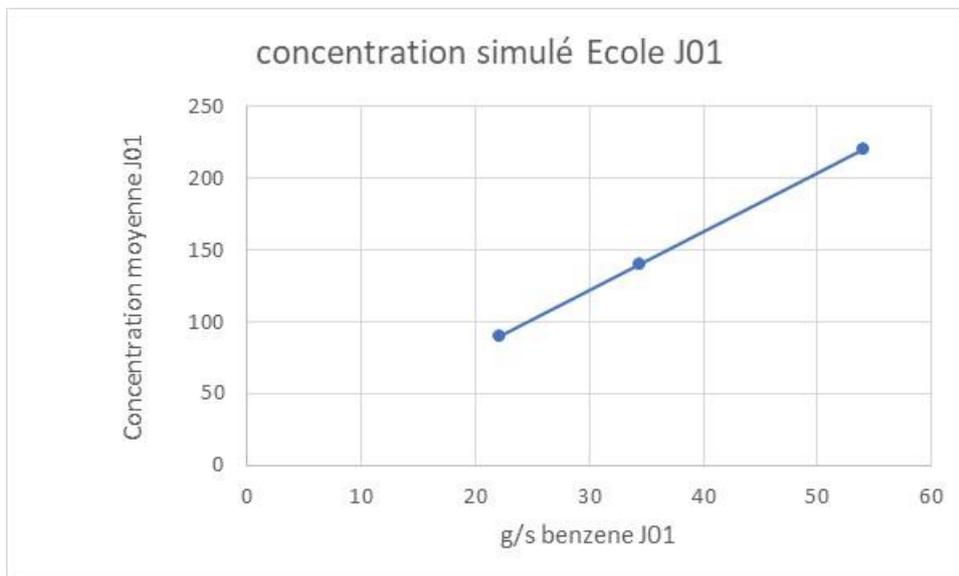


Figure 15 : Simulation de la concentration moyenne la J01 sur l'Ecole en fonction du taux d'émission de benzène pour la journée.

On conclura donc pour J01 qu'une émission de 35 g/s (Scénario 2) ne permet plus d'apporter du benzène le J02 sur l'Ecole, alors qu'une émission de l'ordre de 22 g/s (Scénario 3) le J01 autorise une émission de l'ordre de 10 g/s le J02. Avec cette répartition, la simulation et / ou l'émission en moyenne est cohérente avec la mesure sur le collège, avec une tendance à la surestimation pour intégrer l'incertitude de l'approche.

Par rapport à la première estimation sur la base uniquement des canisters (Scénario 1 : 54 g/s), l'émission moyenne pour le J01 serait au maximum de 35,9 gs^{-1} (Scénario 2 ; soit 35 % de moins), et plus logiquement à l'environ de 22 gs^{-1} (Scénario 3), soit 60 % de moins que la première estimation. Le J02 devrait se situer à environ une dizaine de g/s.

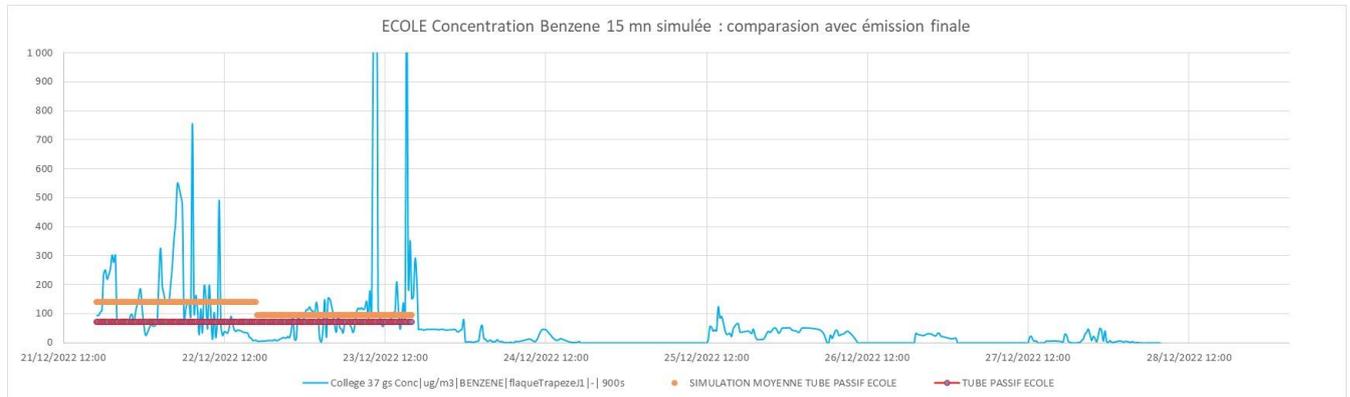


Figure 16 : Simulation finale sur le domaine référence et comparaison avec la concentration intégrée sur le tube passif de l'école (rouge mesure 70 µg/m³ ; orange moyenne simulation par jour J01 & J02 ; bleu : simulation avec J01 à 35,9 g/s, et J02 à 10 g/s)

Le graphique ci-dessus illustre un scénario 2 avec une prise en compte des incertitudes en considérant une moyenne de 140 µg/m³ sur J01 et 100 µg/m³ sur J2, ce qui est majorant par rapport à la mesure d'Air Pays de la Loire (70 µg/m³). Cela correspond à une émission de 35,9 g/s sur J01 et 10 g/s sur J02.

Un scénario 3, plus proche de la valeur intégrée sur les deux jours (on atteint 100 µg/m³ en moyenne sur l'école) sera également considéré, il correspond à une émission de 22 g/s sur J01 et 10 g/s sur J02.

Comparaison à l'analyseur BTEX Remorque située au niveau du stade :

Sur cette période, l'ajout des différents tapis conjugués à des vents faibles assurent un maintien encore plus efficace des tapis de mousse.

Le contrôle des émissions par rapport à une nappe à l'air libre peut être estimé par rapport entre les mesures de benzène sur la remorque et la simulation. Pour simplifier la relation, l'émission simulée est reportée à 1 g/s (émission unitaire), cela permet d'avoir directement par ratio = [mesure concentration moyenne / simulation concentration moyenne avec émission unitaire] directement comme une émission en g/s.

Dans la mesure où le capteur sur la remorque a fonctionné en continu, l'intégration par pallier de 24 heures permet de caler l'émission sur la moyenne de chaque journée type. Les valeurs d'émission ainsi déterminées sont comprises entre 0,35 et 1,08 g/s, pour pallier la variabilité court terme de l'émission (effet vent, action pompage, hétérogénéité ...), un facteur de 20 % de sécurité supplémentaire est ajouté portant les émissions dans la gamme 0,42 – 1,3 g/s.

Avec ses émissions, la moyenne des concentrations simulées sur la période se cale à la valeur moyenne de 32,1 µg/m³ pour une mesure de 30,2 µg/m³ sur la période de J3 à J7.

Par rapport aux émissions calculées par la formule de la nappe, la période de vent très faible rend plus délicate sa représentativité, et le facteur limitant pour l'émission semble plus corrélé à l'état du tapis de mousse, l'évolution de l'étendue de la flaque et des actions de pompage difficiles à retracer. On retiendra donc des valeurs d'émissions fixes par journées sur la base du ratio entre mesure et simulation majoré.

Le tableau suivant reporte les valeurs moyennes pour les journées de présence de l'analyseur BTEX et les valeurs d'émission estimées par un ratio d'intégration journalier. Il faut cependant prendre en compte que cette approche de RDM a une incertitude de l'ordre de +/- 30 % sur des mesures court terme (heure). Sur des valeurs moyennées, à l'échelle de la journée elle a été considérée meilleure avec juste une majoration de + 20 %.

JOUR	Concentration BENZENE Moyenne REMORQUE 2	Concentration Moyenne simulation 1 g/s relief et Landuse	Emission estimée par ratio des concentrations moyennes (Mesure / Simulation 1 g/s)	Majoration de +20 % pour compenser variabilité temporelle
J03	42,8	75,6	0,57	0,68
J04	35,0	32,4	1,08	1,30
J05	24,2	38,9	0,62	0,75
J06	23,2	58,5	0,40	0,47
J07 (*)	23,6	67,0	0,35	0,42

(*) fin de flaqué le 28/12 à 07 h

Tableau 3 : Estimation émission à partir des mesures benzène Remorque

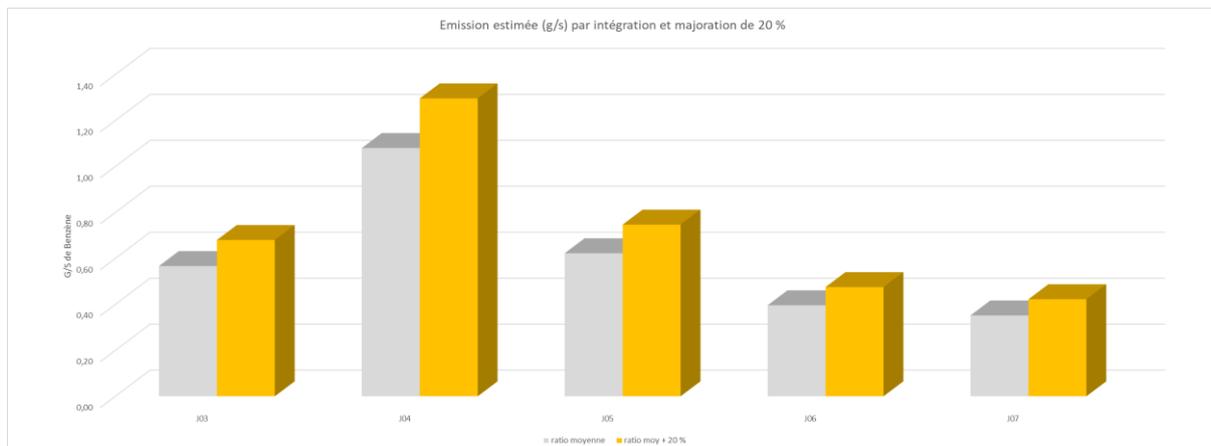


Figure 17 : Emissions de benzène estimées par RDM et majorée de 20 %

Les recalculs avec les émissions moyennes journalières déterminées ont tendance à sous-estimer les mesures de l'ordre de 9 %. Une majoration de l'émission de 20 % est appliquée pour s'assurer que toutes les simulations seront supérieures à la valeur du capteur. La Figure 19 reporte la valeur moyenne mesurée et les concentrations simulées avec l'émission déterminée par ratio sans et avec majoration

de 20 %. Il ressort une surestimation moyenne sur la période de + 9,5 %, avec cependant une légère sous-estimation le J05 de 2 %.

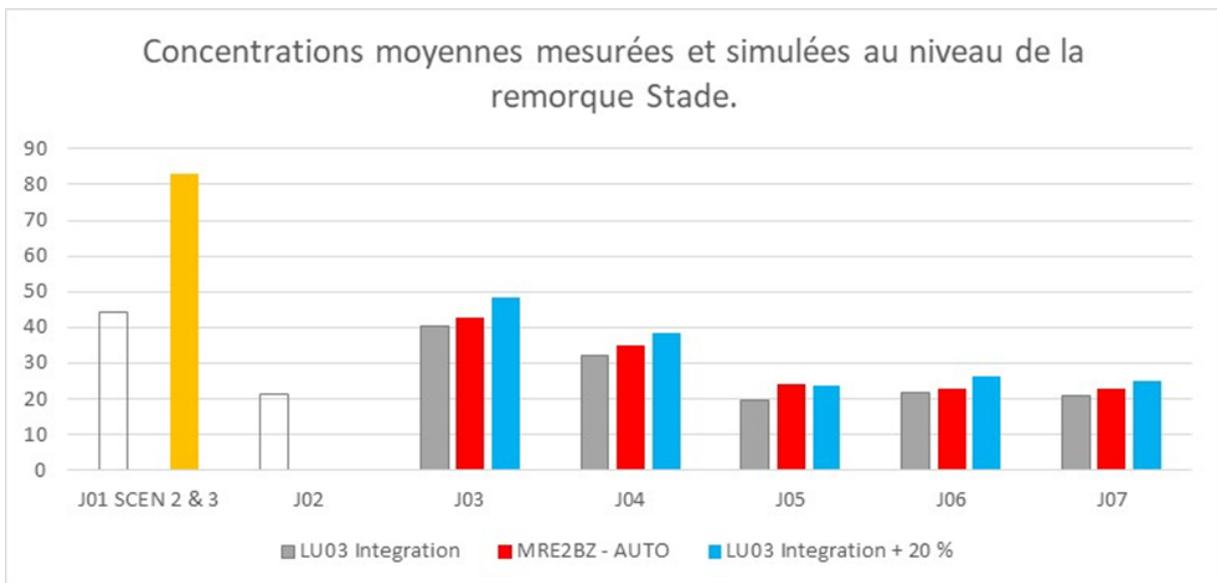


Figure 18 : comparaison mesure moyenne journalière remorque et simulation avec émission de benzène estimée par RDM et majorée de 20 %

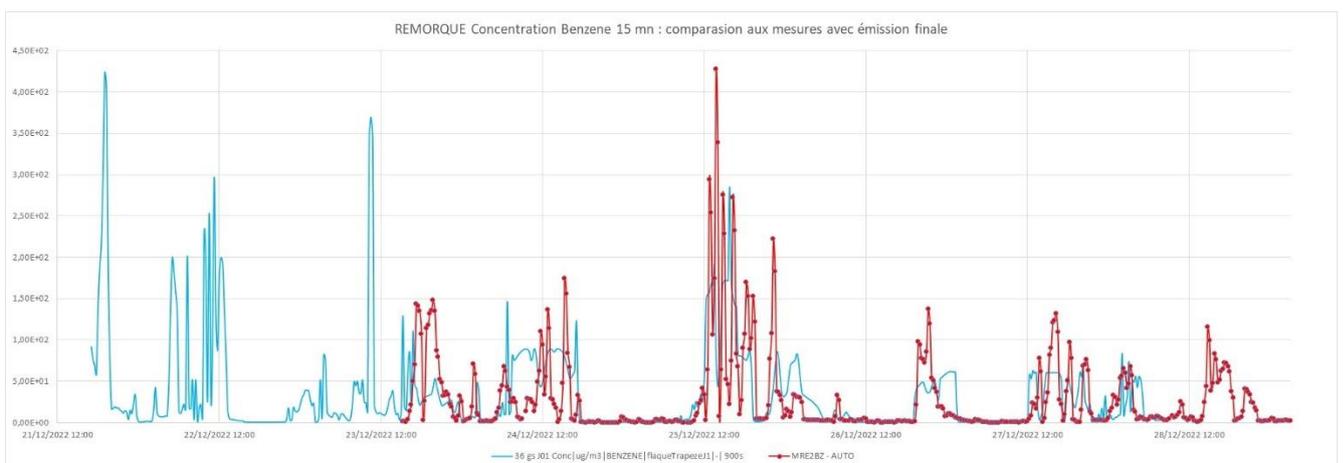


Figure 19 : Simulation finale des concentrations de benzène estimées par RDM comparée aux mesures Benzène de la remorque (Scenario 2 35,9 g/s J01 et J02 10 g/s).

II.2.1. Débit de fuite retenu et évolution chronologique confrontation avec la perte en benzène :

A- DEBUT FUITE supposé : 21/12/2022 de 17 H à 20 H

Le débit de fuite liquide sur la période la plus importante est de l'ordre de $65 \text{ m}^3 / \text{h}$ soit 120 g/s d'arrivée de benzène liquide.

On retiendra :

- au point de fuite du bac, une émission très localisée correspondant à la perte d'un jet liquide avec vraisemblablement un flash (estimation de l'ordre de 1 %, soit 1 g/s) et un ruisseau reliant ce liquide à la cuvette ouest (flaque principale).
- l'émission de la flaque d'hydrocarbure à l'air libre écoulee sur 500 à 3600 m^2 .

On reproduira l'émission sous la forme d'un trapèze de rayon de la flaque maximale (4250 m^2) pour représenter l'incertitude sur la zone d'émission et intégrer dans une seule source la fuite au pied de bac (flash & ruisseau entre le bac et la flaque) et la flaque. On considérera que cette expansion initiale ne modifie que peu les concentrations à plus de 500 mètres pour l'objectif d'une concentration moyenne journalière.

Pour cette période, aucune mesure de concentration de benzène dans l'air n'est disponible (premier canister installé par les pompiers n'est en place qu'à partir de 23h40 le 21/12).

Il n'est donc aucune autre solution que d'extrapoler l'émission à partir des Règles d'entraînement des hydrocarbures avec une formule de calcul de type nappe d'hydrocarbure. Les paramètres d'influence sont la Surface, la longueur, la vitesse du vent, la température et les spécificités de la molécule de benzène (tension de vapeur, teneur dans le mélange ...).

Pour les trois premières heures de fuite, l'émission utilisée sera celle des calculs de l'émission selon la méthode INERIS avec un V 1 mètre calculé selon Vendel à rugosité $0,005 \text{ m}$ et avec la teneur en benzène maintenue constante ($0,88 \%$ massique), mais modulé par le facteur correctif du J01.

B- fuite et MODIFICATION ENTRAINEMENT DES HC : 21/12/2022 20 H au 22/12/2022 à 7 h

L'émission d'hydrocarbure est toujours constituée d'un flash au point de fuite et d'autre part, l'émission de la flaque mais pas toujours à l'air libre.

La mise en place d'une mousse en surface réduit la capacité d'échange entre la nappe d'hydrocarbure et l'air. Le tapis de mousse a été complètement mis en place dès 20h07, mais il a fallu l'entretenir.

La question est de savoir de combien ce tapis de mousse a réduit les émissions de benzène.

Dès l'intervention des pompiers, le modèle de flaque d'hydrocarbure devra être corrigé. Seulement, il n'existe pas de relation connue pour prendre en compte une modification d'interphase air – hydrocarbure par un épandage de mousse anti-feux. Ce type de mousse a pour vocation de réduire l'émission, mais on ne pourra « paramétrer l'efficacité de réduction » qu'en fonction d'hypothèses.

Parmi les paramètres à modifier dans le modèle de nappe avec mousse, un facteur multiplicatif de correction en fonction de l'état du tapis de mousse a été ajustée aux informations des pompiers.

D'après les analyses canisters de la nuit du 21 au 22/12, en cas de tapis dégradé le facteur multiplicatif sera de l'ordre de 0,5. C'est-à-dire que par rapport au modèle INERIS le plus majorant, 50 % de l'émission potentielle est contenue lors des prélèvements canister.

C-MODIFICATION ENTRAINEMENT DES HC : 22/12/2022 à 7 H au 28/12/2022 à 7 H

L'analyse du canister du 22/12 à 17 H indique une réduction par rapport au modèle de l'ordre de 70 à 85 % lorsque la mousse est bien en place. Le facteur multiplicatif serait de l'ordre de 0,15 à 0,3.

Entre le 22/12 17H (dernier prélèvement canister exploitable) et la mise en place de l'analyseur mobile sur le stade, la seule donnée est la mesure sur le collège par prélèvement sur 15 jours. Il n'est pas possible de décorréliser sur cette mesure précisément l'efficacité des tapis de mousse au cours du temps mais cela peut être exploité pour évaluer la tendance d'amélioration ou non du tapis jusqu'à l'implantation de l'analyseur BTEX. Les 4 tapis de mousse successifs appliqués du 22/12 au 23/12 apportent une épaisseur plus significative, d'un point de vue physique, il est fort probable que le facteur limitant devienne l'épaisseur de mousse et / ou sa perméabilité. Une comparaison avec la simulation avec un tapis efficace à 85 % de réduction telle que déterminée avec le canister conduit à une tendance à la surestimation par rapport à la mesure sur l'école ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ simulé pour les 48 h depuis le début de la fuite) pour $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ extrapolé de façon majorante à partir de l'analyse 8 jours (tout le benzène est considéré comme uniquement lié au 48 dernières heures). L'efficacité de réduction apparente serait à minima de plus de 89 % en moyenne sur J02.

Puis à partir du 23/12 à l'installation de l'analyseur BTEX, le tapis reste « au top » et régulièrement maintenu. Le facteur multiplicatif de modification de l'interface par la mousse serait encore inférieur, mais la méthodologie RDM se basant sur l'observation de la concentration dans l'air, l'émission estimée englobe également toutes les actions (mousses, pompage ...). On retiendra donc des valeurs fixes d'émission moyenne par jour entre 0,42 et 1,30 g/s déterminées par RDM. Ce qui représente des efficacités de réduction apparente (effet mousse et pompage) toujours supérieures à 90 %.

III. Evaluation des concentrations de benzène dans l'air

III.1. Influence par journée avec émission intégrant la présence d'un tapis de mousse.

Pour rester entre les émissions estimées et les concentrations observées, la simulation est conduite avec la paramétrisation du modèle intégrant le relief et la rugosité variable réajustée. Il n'est pas pris en compte de contrainte verticale car une analyse des profils de température de modèle numérique (WRF de la société Numtech à la résolution horizontale de 3 km) calcule des hauteurs de couche limite en accord avec ADMS .

Pour chaque journée la concentration moyenne est reportée avec les émissions telles que définies précédemment, c'est-à-dire :

- pour J01: à partir de la formule de la flaque réajustée par la présence de mousse .
- pour J02 : comme pour J01 mais avec l'hypothèse d'une augmentation de l'efficacité des tapis successifs portée 95 % en moyenne sur la journée.
- à partir de J03, des émissions moyennes estimées par RDM majorée de 20 % sont utilisées.

Les cartes représentent la concentration moyenne modélisée sur la période avec prise en compte du relief et de la rugosité variable.

JOUR01 : 21/12/2022 17 H → 22/12/2022 16H45

L'estimation en prenant compte une émission moyenne de 22 g/s (Scénario n°3) est reportée sur la figure suivante.

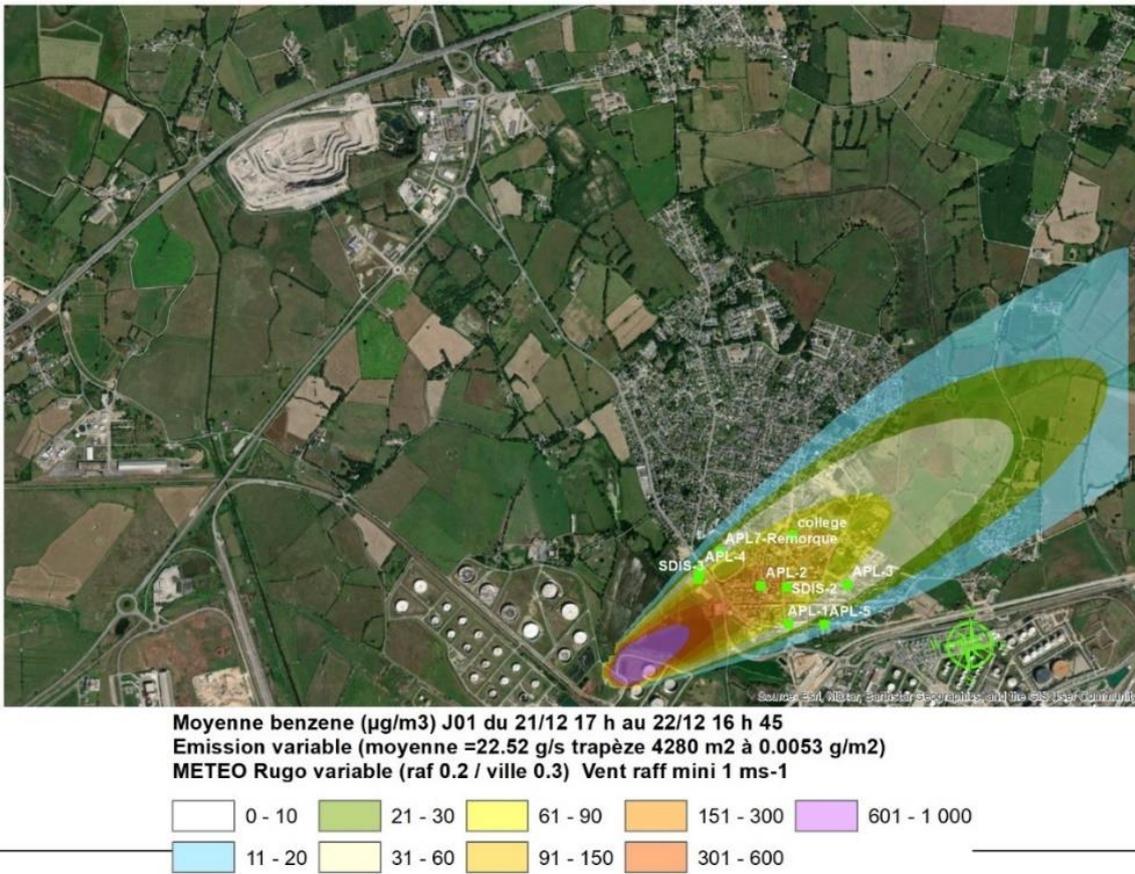


Figure 20 : simulation concentration benzène moyenne J01 – Scénario 3

Comme défini précédemment, un scénario alternatif (Scénario 2) en ajustant la valeur d'émission à 36 g/s de benzène, soit la totalité du benzène mesurée sur l'école en une seule journée, les concentrations moyennes sont reportés sur la carte ci-dessous. Les concentrations sur la ville sont très certainement majorés.

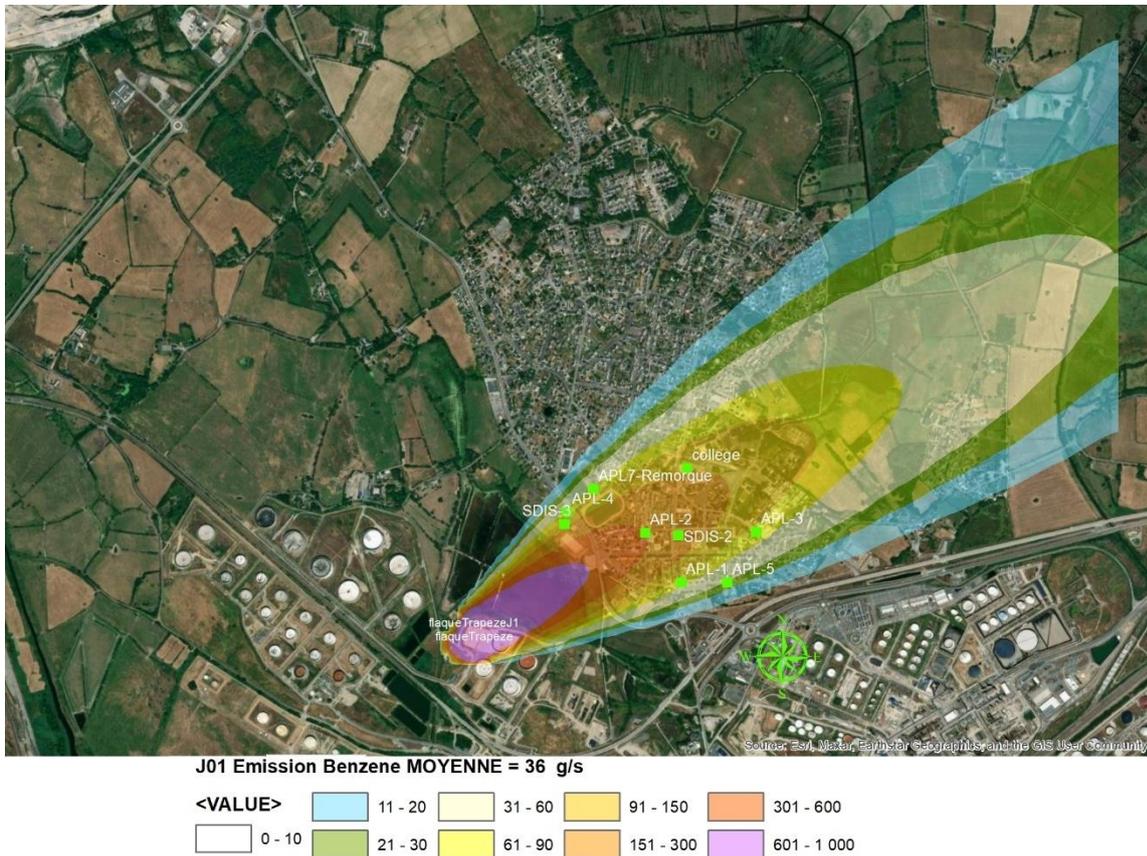


Figure 21 : simulation concentration benzène moyenne J01 à 36 g/s de benzene (Scénario 2)

Le scénario 1 n'est pas illustré car il est incohérent en termes de bilan de benzène et de moyenne observée sur le tube passif de l'école.

JOUR02 : 22/12/2022 17 H → 23/12/2022 16H45

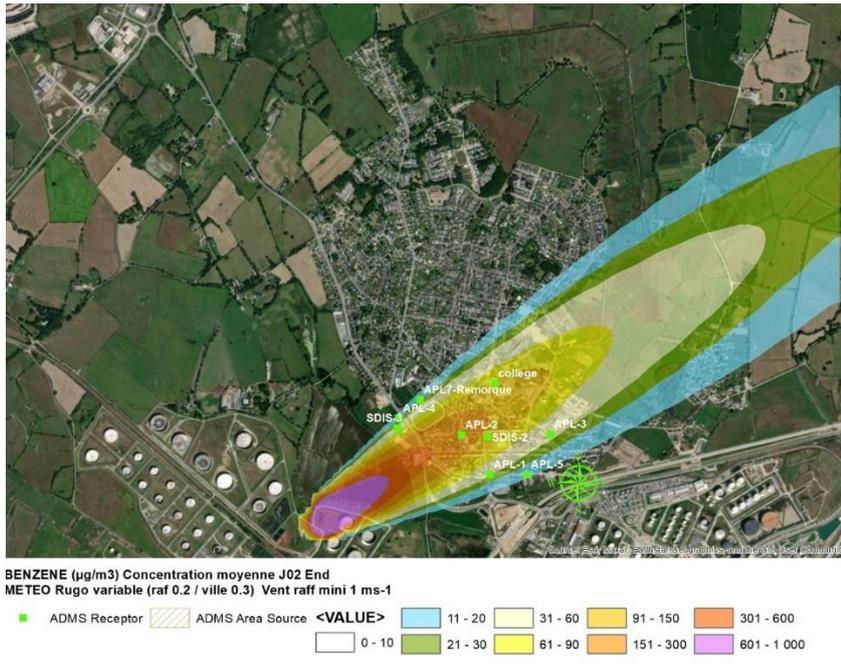


Figure 22 : simulation concentration benzène moyenne J02 de l'ordre de 10 g/s

JOUR03 : 23/12/2022 17 H → 24/12/2022 16H45

À partir de cette journée l'analyseur BTEX permet de recalibrer l'émission avec les mesures, l'émission est maintenue constante comme noté Figure 18.



BENZENE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Concentration moyenne J03 End
METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville 0.3) Vent raff mini 1 ms-1

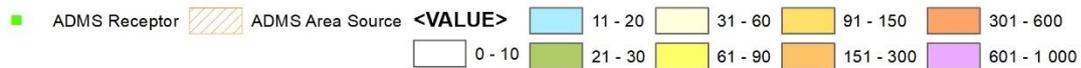


Figure 23 : simulation concentration benzène moyenne J03

JOUR04 : 24/12/2022 17 H → 25/12/2022 16H45



BENZENE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Concentration moyenne J04 End
METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville 0.3) Vent raff mini 1 ms-1



Figure 24 : simulation concentration benzène moyenne J04

JOUR05 : 25/12/2022 17 H → 26/12/2022 16H45



BENZENE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Concentration moyenne J05 End
METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville 0.3) Vent raff mini 1 ms-1

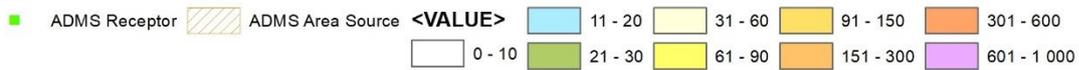


Figure 25 : simulation concentration benzène moyenne J05

J6 : 26/12/2022 17 H → 27/12/2022 16H45



BENZENE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Concentration moyenne J06 End
METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville 0.3) Vent raff mini 1 ms-1

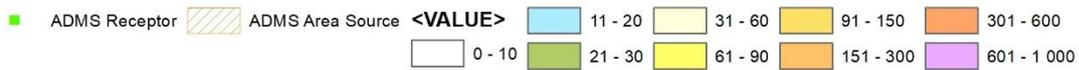


Figure 26 : simulation concentration benzène moyenne J06

J7 : 27/12/2022 17 H → 28/12/2022 07H45

Pour cette période, la moyenne est effectuée sur seulement 15 heures, ceci correspond à la fin de l'évènement de la flaque d'essence.



BENZENE (µg/m3) Concentration moyenne J07 End
METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville 0.3) Vent raff mini 1 ms-1

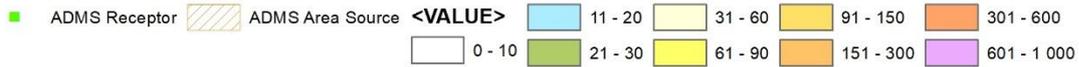


Figure 27 : simulation concentration benzène moyenne J07 entre le 27/12 17 h et le 28/12 07h45

III.2. Extrapolation sur 14 jours

La VTR étant valable pour des durées d'expositions allant de 1 à 14 jours, il est intéressant d'extrapoler l'exposition moyenne sur cette durée.

Sur la base des valeurs mesurées par Air Pays de la Loire dans le cadre de la campagne de surveillance environnementale du site dans le bourg de Donges³, de l'analyseur placé au stade jusqu'au 31/12/2023, et des tubes passifs dans la phase secondaire de l'évènement du P551⁴, une valeur de bruit de fond post évènement de +4,17µg/m³ est ajoutée (+ 8 µg/m³ sur 2,67 jours post évènement et le bruit de fond de + 2 µg/m² sur la période globale moins les 2,67 jours).

La chronologie d'extrapolation de la simulation de l'évènement est reportée dans le tableau ci-dessous.

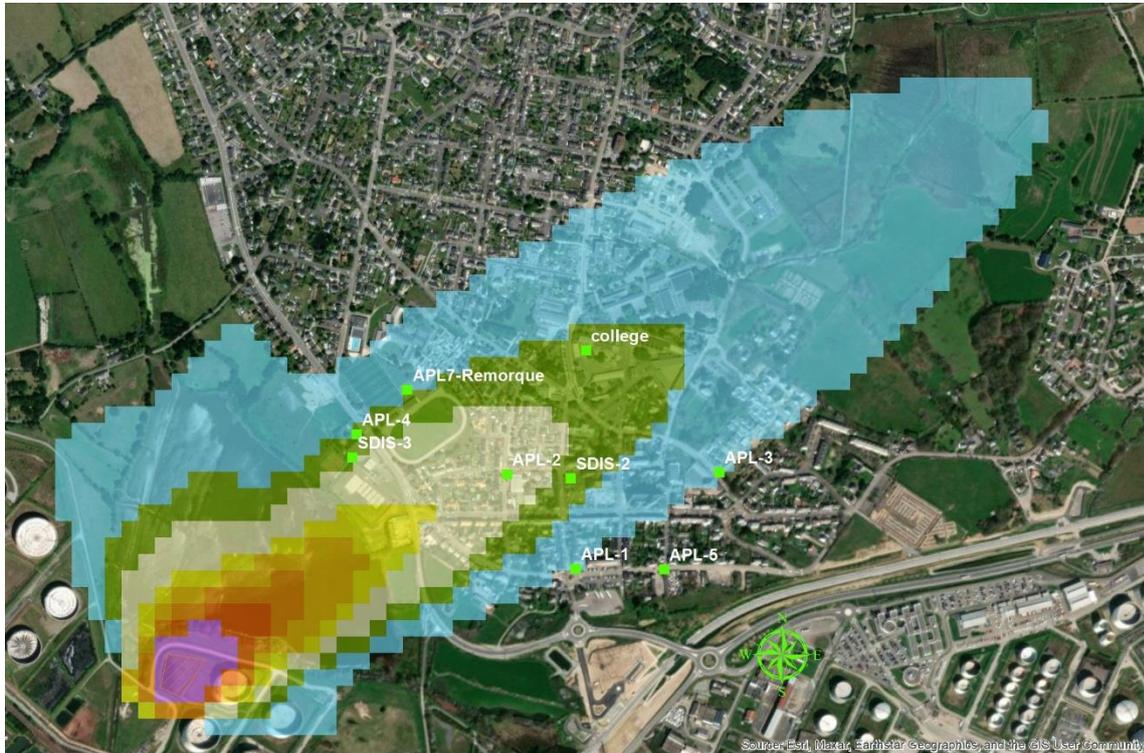
Période	Durée (jours)	Mesure (µg/m ³)	Simulation Ecole (µg/m ³)	Simulation Stade (µg/m ³)
J01-J02		70 (Ecole)	93,4	30.0
J03-J07		30,2 (Stade)	20,6	32.1
Moyenne période incident	6,625		42,6	31
Du 28/12 8h au 31/12	2,67	8 (Stade)		
Mesure 8 jours début 2023	4,71	2 (Max Ville)		
Concentration post incident appliquée sur l'ensemble du domaine	7,375		+4,17	+4,17
Extrapolation 14 jours	14		22,25	16,86

Tableau 4 : description de la méthode d'extrapolation sur 14 jours Scenario 3 (22,5 g/s en J1).

L'évaluation de la concentration de benzène sur 14 jours est illustrée sur la figure ci-dessous.

³ Évaluation des niveaux de COV, de métaux et d'acide cyanhydrique dans l'air dans l'environnement de la raffinerie TotalEnergies à Donges, 2022 ; 15/05/2023 Air pays de la Loire

⁴ Qualité de l'air liée à l'incident de la raffinerie de Donges - Rapport n°3 des mesures effectuées - décembre 2022 – janvier 2023 ; Avril 2023 – Air Pays de la Loire



Extrapolation 14 Jours EmissionEnd

METEO Rugo variable (raf 0.2 / ville var) Vent raff mini 1 ms-1

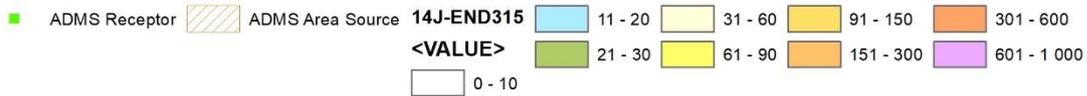


Figure 28 : Extrapolation des concentrations moyennes de benzène sur 14 jours (Sc 3)

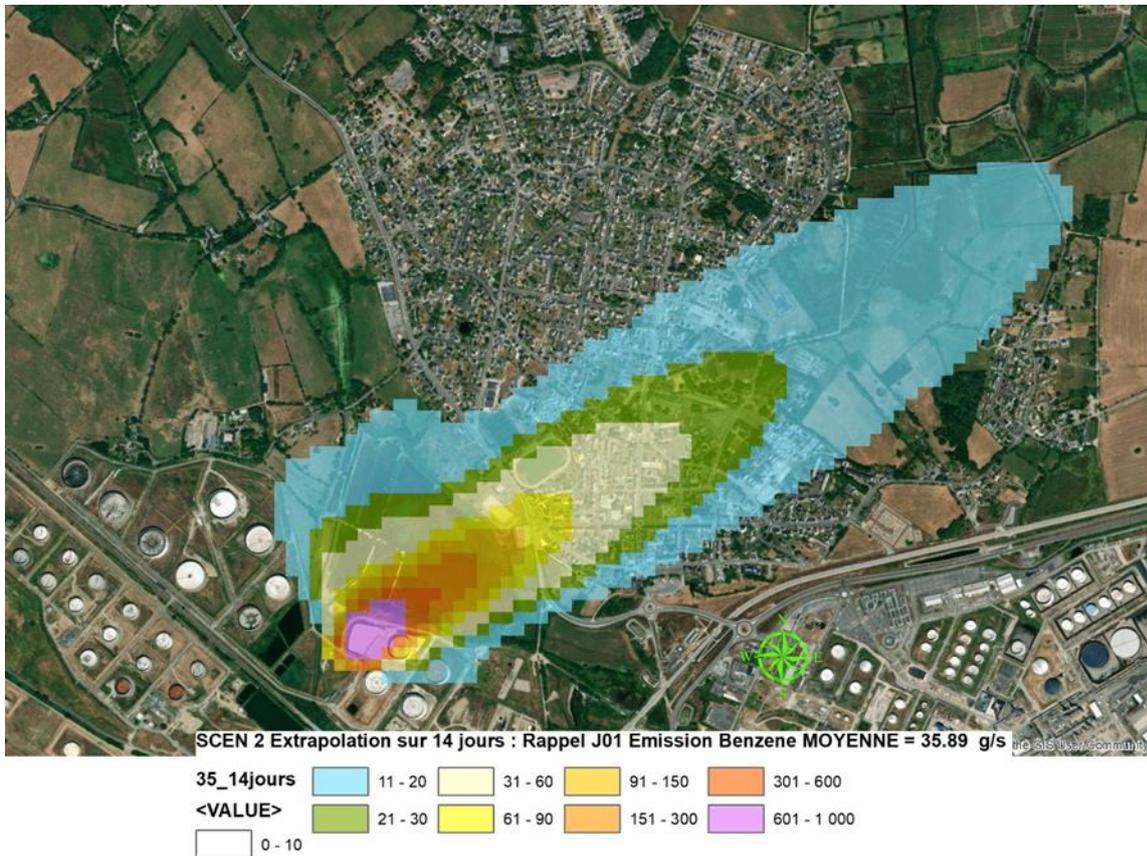


Figure 29 : Extrapolation des concentrations moyennes de benzène sur 14 jours (Sc 2)

Les valeurs extrapolées de concentrations sur 14 Jours au collège et à la remorque Air Pays de la Loire sont proches et respectivement de 22 et 16,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le scénario 2. Dans le scénario 3, les valeurs extrapolées sont 26,6 et 18,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La chronologie des émissions, la météorologie et la localisation des mesures ont fait que le collège a été plus impacté que la remorque comme vu précédemment. Les concentrations moyennes sur la ville dépassant 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont plus au Sud Est du stade.

L'ajout d'un bruit de fond sur l'ensemble du domaine apporte également une majoration de la concentration moyenne, notamment sur la ville.

IV. Conclusions

Le modèle de dispersion ADMS a permis d'estimer à partir des mesures disponibles les ordres de grandeurs d'émissions compatibles, il a été fait le choix d'être majorant par rapport aux mesures intégrées sur 24 heures.

Cependant, la première journée est plus compliquée à estimer, et pour celle-ci deux scénarii de concentrations sont présentés en fonction d'hypothèse d'émission conduisant à une surestimation de la concentration mesurée sur l'école par tube passif.

Avec l'incertitude inhérente à toute étude de modélisation, l'émission de benzène en présence de mousse a été calculée, et les ordres de grandeurs d'émission sont compatibles avec la quantité initiale de benzène.

L'efficacité de réduction des émissions par rapport à un modèle de nappe d'hydrocarbure est estimée à plus de 85 % d'efficacité lorsque le tapis de mousse est maintenu.

Les actions de pompage et superpositions de tapis de mousse conduisent à des réductions apparentes par rapport au modèle de flaque de plus de 90 %.

Les concentrations ont été simulées avec le modèle ADMS utilisé dans les études d'impact en prenant en compte les hypothèses de présence de mousse et les estimations par RDM à partir des mesures disponibles.

Il est à noter que les concentrations simulées sont vraisemblablement majorés dans la ville de Donges **pour les moyennes journalières utilisées dans l'étude sanitaire** car :

- les écoulements dans la ville sont modélisés par une rugosité moyenne et homogène.
- les valeurs d'émissions ont été calées pour garder une marge par rapport aux mesures de concentrations intégrées journalières.
- Les concentrations simulées sont en air ambiant, aucune réduction pour passage à l'intérieur des habitations n'a été faite alors que le seuil journalier retenu est un seuil d'exposition d'air intérieur.

V. ANNEXES

V.1.Analyse PHONA essence FCC du 19/12/2022

	reformulyzer	P551-191222-
Data FileName	: C:\Chem32\1\DATA\D2212\P551-191222-.d	
Operator	: Admin	Vial : 101
Acquired On	: 12/19/2022 9:37:57 AM	Inj Volume : 0,1 µl
Processed On	: 12/19/2022 9:38:01 AM	
Sample Name	: P551-191222-	
SampleGroup	: Essences FCC	
Sample Type	: Standard PHONA	
Instrument Method	: phona	

Analysis Conditions

A	3.9	OlefinSep1	90
B	5	OlefinSep2	150
E	2.5		

Normalized weight percent results

C-nr	Naph.	Paraf.	Cycl Ol.	Olef.	Arom.	Other	Total
3		0.02					0.02
4		5.74		0.64			6.38
5	0.07	2.81	0.10	2.54			5.52
6	2.76	6.77	1.67	6.58	0.88		18.66
7	5.15	9.04	2.23	5.45	7.28		29.15
8	3.46	6.42	0.97	2.69	10.16		23.70
9	1.29	2.64	0.21	0.77	4.46		9.37
10	0.35	1.31		0.15	4.59		6.41
11			0.25	0.13			0.38
12+		0.15			0.27		0.41
Poly							
Total	13.08	34.89	5.43	18.96	27.64		100.00

V.1.1. Station météorologique de la raffinerie

La station météo se situe sur le blockhaus N°2 face sous station Jouy et Bac P811.
La distance entre la station météo et le BAC551 est de 1 200 mètres.

Pour la hauteur précise, la mesure au télémètre laser a déterminé que le niveau girouette / anémomètre est à 18,10 m, décomposé comme hauteur de mat (13,6 m) + hauteur du blockhaus (4m50).

Le matériel est suivi et étalonné.



Figure 30 : cartographie avec positionnement station météo et photo

V.1.1. Complément suite à la réunion INERIS

Définition du terme source Flaque à l'air Libre :

La difficulté de l'étude réside dans l'établissement d'un terme source avec de nombreuses conditions variables. Il a été retenu d'établir ce terme à partir de principes physiques de type formule flaque INERIS.

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres utilisés et leur justification avant, et après réunion avec INERIS.

$$=B\$40*AC12*X12*AB12^{(-1/(1,4*LN(AB12)+4,52))*K\$33^H\$33*78*(M\$33*0,0105)/((273+V12)*8,31)}$$

		Justification avant réunion	Suite discussion Ineris / TTE	Ordre de grandeur / amélioration à conduire
B\$40	= 5.10-3			
AC12 = variable	Surface de la flaque	majorante	Ordre de grandeur réaliste	Pas d'absorption dans le sol, pas de diminution par évaporation et prise intégration eau dans le volume.
	Température surface de la nappe, conditionne la tension de vapeur	Majorante car l'évaporation des HC demande de l'énergie. Fixe à 10 °C, température de l'air météo France à Montoir 12,6° début évènement		
X12	Vitesse U1 m	Voir comparaison avec Griffin, à minima +/- 35 % en fonction de la rugosité (0.2 ou 0.1) au niveau de la nappe, voir *2 si rugosité = 0.005		
AB12	Longueur de la nappe (m).		Pas en accord avec forme nappe trapézoïdale, mais les cas étudiés sont toujours des formes simples (circulaire ou rectangle)	Calculée sur principe d'une surface équivalente =2*(AC12/3,14)^0,5
=AB12^(-1/(1,4*LN(AB12)+4,52))	Exposant sur Longueur équivalente	équivalent à facteur 0.7. Dans la mesure où la forme de la nappe n'est pas réellement connue, il a été fait le choix de faire le calcul de la masse de benzène émise sur la base d'une « flaque » ronde. Par contre, dans le calcul de dispersion, la nappe a été représentée sous la forme d'un trapèze étendu pour tenir compte de l'incertitude de position et du flash du début. Cette extension permet de relier un calcul de perte de masse en continu à une émission variable selon l'angle du vent. Le calcul d'un débit sur une flaque variable en fonction de la rugosité et de l'angle du vent entrainerait trop d'incertitude.		
K\$33^H\$33	Sc = 1,70454 H\$33 = p = 0.67			
	Avec pour Sc visco			Coeff visco benzene 0,088 à 10°

	benzene =0,000015/(0,088/100^2)			
78*(M\$3 3*0,010 5)	Tension de vapeur du benzène = 6039 kPa *	Calcul à Pression constante 101325		Intégrer à l'avenir la variation de température en fonction du temps car une variation de +1° représente + 5 %, notamment dans la formule avec mousse
0,0105	Concentratio n benzène molaire.	Majorante en conservant constante		
/((273+ V12)*8, 31)	Température raffinerie			
m = 1				

Tableau 5 : description des paramètres utilisés dans le calcul de la flaque.

V.1.1. Détails des paramètres retenues dans la modélisation du terme source

- Représentation de la vitesse du vent à 1 mètre U1 :

La zone de la fuite se situe dans une partie de la raffinerie présentant des obstacles bacs, arbres et merlon de protection. La rugosité a été fixée à : 0,2 m quelle que soit la direction du vent pour être en accord avec l'implantation de la station météorologique.

Comme expliqué, la vitesse du vent U1 a été calculée par la formule de Vendel. Pour retrouver comme la formule de Griffin en neutre à partir de la mesure du vent à 18 mètres ($=1/(18^{0,12}) * U_{12}$), la vitesse de U1 avec la formule utilisée dans la présente étude, une rugosité de 0.005 doit être utilisée.

Avec le choix d'une rugosité de 02 m, le résultat s'écarte de la formule préconisée par l'INERIS d'un facteur constant de 22 essentiellement car dans le calcul INERIS la surface de la flaque est considérée comme lisse sans prendre en compte la présence d'obstacle autour et que la flaque génère sur toute son étendue un écoulement uniforme sans résistance.

Chaque mode de calcul de U1 évolue selon la même variation, l'amplitude sera elle directement appliquée au même calcul des autres termes en conservant la teneur benzène constante. La quantification de l'émission « flaque nue » sera directement proportionnelle à cette valeur.

Dans la réalité, la vitesse de frottement sur la nappe n'est pas homogène, seul un calcul de mécanique des fluides pourrait apporter une représentation améliorée. Cependant, il faudrait l'adapter à chaque pas de temps (météo variable, vitesse et orientation, concentration de benzène en surface et état et répartition de la mousse ...), ce qui est potentiellement encore source de plus d'erreur.

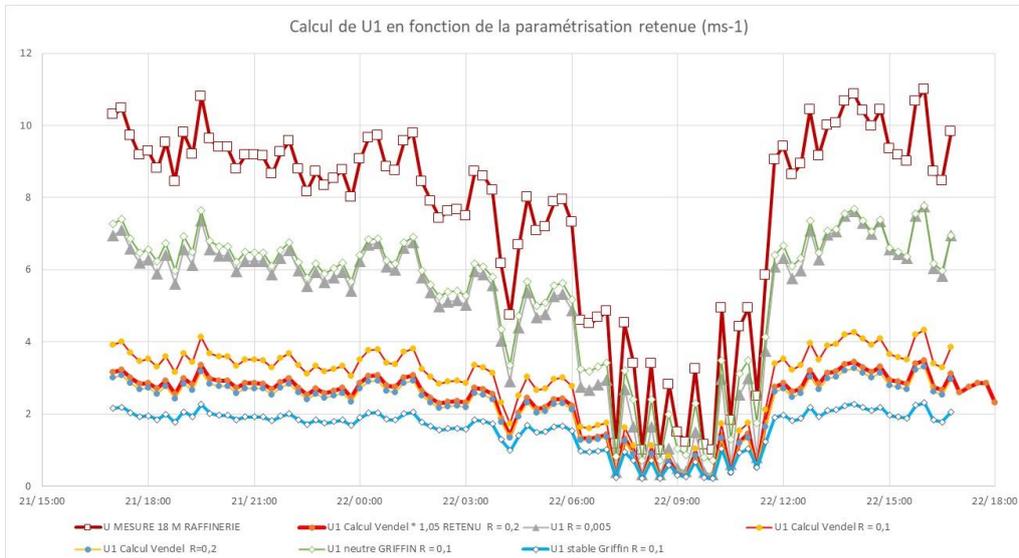


Figure 31 : Mesure du vent par la station météo et calcul de U1 en fonction de la paramétrisation de Griffon ($rug = 0.1$) ou Vendel ($rug = 0.2 ; 0.1$ et 0.005)

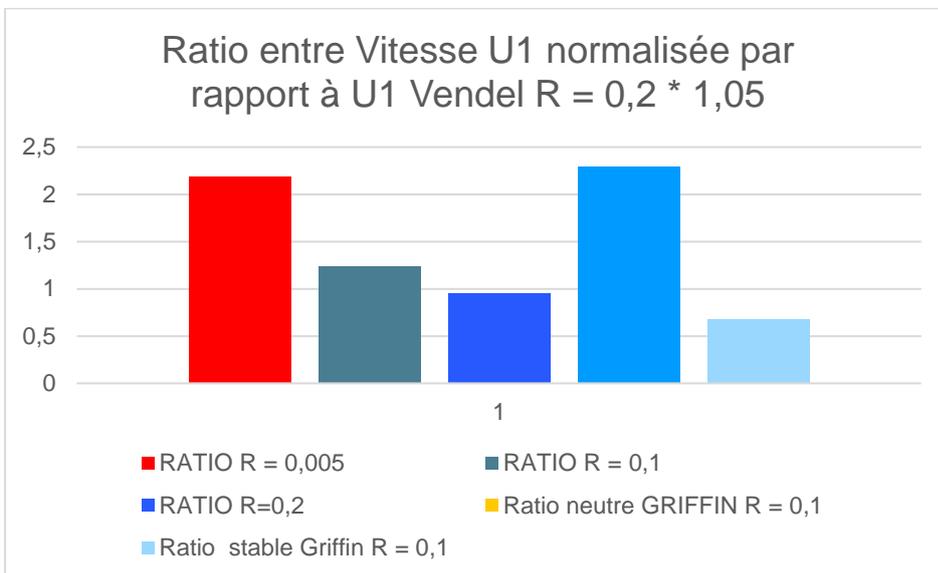


Figure 32 : Ratio par rapport à la vitesse U1 retenue dans la simulation ($[Vendel R= 0.2] * 1.05$)

Définition du terme source Flaque en présence de mousse :

Application de la formule précédente avec un facteur de réduction en % d'efficacité de la couverture de mousse. Ce facteur est déterminé par comparaison entre la « mesure » et des tests faisant appel à une modélisation de la dispersion avec une émission théorique et des mesures.

Paramétrisation de la dispersion :

Sélection de la station météo par comparaison restitution direction entre source et enregistrement pics sur le camion laboratoire avec Analyseur BTEX. La station de la raffinerie suit mieux la chronologie des pics que la station de Montoir.

Correction des mesures météo : imposition d'un vent mini (1 ms⁻¹) pour mener le calcul sinon ADMS plante en situation Calm wind, ne représente que quelques ¼ heures (voir figure vitesse vent).

Modèle ADMS 5 puis ADMS 6	Paramètre retenu		
Météo	Station raffinerie 18.1 m, rug 0.2, ADMS Flowstar		Donnée : vitesse, Direction, température raffinerie. Calcul de la Hauteur de couche limite par le modèle.
Pas de calcul	15 mn		
Emission	Source ponctuelle (vitesse nulle) 1 à 50 gs ⁻¹ , puis pour calcul final emission variable	Calcul final avec Source trapèze (vitesse nulle, temp ambiante)	Test de différentes sources (ronde, ponctuelle de différent diamètre et de Source trapèze) avec toujours vitesse nulle, temp ambiante
Test Large échelle	Module Terrain 15 km	Généré par Numtech	
	Module Land Use 15 km basé sur CORINE LAND COVER , seul la rugosité eau est passé à 1.10 ⁻⁴ .	Ville : max 0.3	Des modifications

		Rugo : eau (étang / Estuaire) 1 e-4	sur la rugosité de l'eau : passe de 1.10-3 à 1.10-4.
--	--	-------------------------------------	--

Utilisation d'un calage de l'émission en fonction des données disponibles. Chaque type de donnée apporte des informations différentes en localisation, durée.

Canisters : utilisation pour évaluer l'efficacité du tapis de mousse	J01 – J02 Prélèvement ponctuel, au sol détermination sur période prélèvement (2 à 3 pas météo selon horaire)	Position comparée au cœur du panache avec prise en compte incertitude distance et position versus cœur panache. Fait sur arcGis. Comme il s'agit de la comparaison la plus complexe (concentration court terme ponctuelle) les choix et données sont reprises dans un annexe dédié.
Tube passif Ecole : utilisation en contrôle final pour cohérence sur période J01 – J02.	Intégration sur période J01-J02	Apporte une information sur l'impact cumulé (plus représentatif du flux massique moyen).
Analyseur BTEX : Utilisation pour fixer émission J03 – J07	Suivi en continu tout ¼ heure	Position fixe au point du capteur et intégration par journée, pas de modulation horaire des émissions car tapis maintenu et évacuation d'une partie du liquide.

Evolution chronologique des émissions en fonction de l'état du tapis.

A partir de la mise en place de la première mousse (21/12 20h00), un facteur de réduction est appliqué. Compte tenu des difficultés de mise en place, la situation a été considérée comme dégradée au bout de 2 heures. Cette approche est majorante car les pompiers ont fait des efforts pour maintenir le tapis au-delà des deux premières heures.

La première mesure PID dite Benzène (mesure non intégrée dans le profil temporel car non reconnue par l'Ineris dans rapport étude sanitaire) se détachant est au garage Renault vers 2H30 du matin, et pas de mesure à ce point avant. C'est dans cette période entre le 21/12 23h50 et le 22/12 3h30 que les canisters aux plus fortes concentrations de benzène sont prélevées (SDIS 2 : 750 µg/m³ 23h40 ; AIRPL 2.1 : 1049 µg/m³ 3h00 ; AIRPL 3.1 : 792 µg/m³)

La situation est considérée comme dégradée jusqu'à la mise en place d'un second tapis dès 6 H le 22/12, remis à 13 h et un troisième à 16 H du fait de pluie.

Ne disposant pas d'information exploitable pour évaluer la performance de ces tapis successifs, il a fallu «prendre » les canisters du 22/12 17H pour observer une concentrations en benzène significative (486 µg/m³) APL1 au sud de Donges mais très faible à l'intérieur de la ville (APL3.3 = 15 µg/m³) . Ces deux canisters pris de façon quasi simultanée illustre la difficulté d'extrapoler une émission à partir de mesure isolée, d'autant que des actions ponctuelles de pompage des hydrocarbures entraine des émissions très hétérogène (rejet à l'atmosphère du camion pompe chargé en hydrocarbure)..

Le premier calcul du J02 a été fait avec une valeur de 85 %, mais réactualisé à 89 % pour mieux caler avec la mesure charbon intégrée sur l'école.

A partir de J03, la formule de calcul de mousse n'est plus utilisée.

Calage des émissions par rapport aux mesures :

L'émission d'une flaque au sol avec ou sans mousse est délicate à appréhender par une formule théorique. Il a donc été retenu de partir de la formule INERIS de flaque avec des paramètres jugés majorants pour reproduire l'évolution temporelle de l'émission avec ou sans mousse, et de mettre en cohérence avec les mesures.

- **Etape 1 : sélection de la station météorologique pertinente.**

Grâce aux mesures en continu de benzène à partir du J03 sur la station mobile, l'évolution chronologique de la concentration en un point est disponible.

Un premier calcul de dispersion avec une émission a priori a permis de vérifier que la station météo de la raffinerie était pertinente en direction car les concentrations mesurées et simulées sont temporellement corrélées, contrairement avec la station Météo France (presque aucun pics synchronisés).

- **Etape 2 : aspect quantitatif**

Il est nécessaire de prendre en compte des incertitudes spécifiques selon le type de mesure, leur localisation, leur représentation spatiale et temporelle.

L'approche par modélisation inverse (ou RDM) demande d'intégrer une incertitude.

L'incertitude est de l'ordre de +/- 30 % lorsque on a simultanément plusieurs mesures et peut être encore plus performante avec une mesure moyennée sur une longue période (24 h à 48 h).

Dans notre cas, toutes les méthodes de mesures sont considérées fiables car réalisées spécifiquement sur le benzène avec des méthodologies normées (LCSQA). A contrario, le prélèvement et sa durée conditionne la représentativité pour une estimation de concentration moyenne journalière.

- La comparaison avec le tube passif de la modélisation finale donne une moyenne fiable sur les deux premiers jours (J01 et J02).
- La mesure sur l'analyseur mobile à partir du Jour03 faite par intégration journalière rentre dans ce cas.

Lorsque on utilise une moyenne, on est plus représentatif d'un flux moyen, alors que sur une prélèvement court terme, on est plus représentatif d'une concentration instantanée.

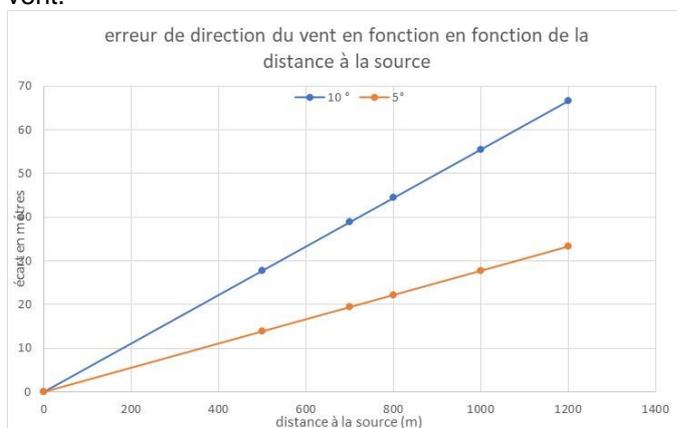
Sur des mesures ponctuelles type canister, on est dans le cadre d'une concentration court terme (1/2 heure) et la méthode est beaucoup plus variable (facteur supérieur à 2, avec par expérience, une tendance à la surestimation de l'émission avec des modèles gaussiens notamment au cœur du panache) car il se rajoute plusieurs incertitudes à la fois représentant :

- la variabilité du vent et des conditions de dispersion à court terme,
- la variabilité de l'émission à court terme

- l'extrapolation à partir de mesures ponctuelles disparates de l'évolution temporelle.

- La variabilité du vent à court terme :

la station de la raffinerie est de qualité, mais l'erreur de la localisation d'un point est fonction de la distance à la source en fonction de l'incertitude de la mesure ou de la représentativité de la station météorologique (+/- 5° ou +/- 10°) en terme de direction et potentiellement +/- 10 % sur la vitesse du vent.



Dans notre cas, les points récepteurs sont compris entre 500 et 1000 mètres de la source. La variation latérale d'un panache sera donc de l'ordre de 10 à 30 mètres à 500 mètres (canister les plus proches), et de 30 à 55 mètres à 1000 mètres (mesures les plus éloignés).

Pour la vitesse, chaque canister ouvert durant 30 minutes présente sa propre variabilité en fonction des données météorologique lors de son ouverture. En utilisant le percentile (concentration maximale au point) à partir des calculs au pas de 15 minutes, on intègre la variabilité au point pour la vitesse en prenant la vitesse la plus faible si durant son ouverture la vitesse varie. Et de même pour la direction, si la direction varie. Si aucun de ces deux paramètres varie, il faut imposer une vitesse minorée de l'ordre de 10 % et une variation de direction de l'ordre de +/- 5°.

- la variabilité de l'émission à court terme :

En accord avec le rapport INERIS : *La forte variabilité des concentrations en benzène mise en évidence durant ces 9 jours pourrait s'expliquer par :*

- les variations de direction des vents dominants, balayant plus ou moins largement les quartiers résidentiels de la commune de Donges ;
- les ruptures dans le tapis de mousse maintenu au-dessus de la rétention en vue d'éviter toute inflammation et limiter les émanations gazeuses, laissant échapper des bouffées de composés volatils dont le benzène sur des périodes plus ou moins courtes (de l'ordre de l'heure) ;
- le pompage effectif de l'essence de la rétention puis son rinçage dès le 28/12 dans l'après-midi.
 - l'extrapolation à partir de mesures ponctuelles disparates de l'évolution temporelle.

Pour améliorer la justesse, il faut également :

- bien connaître la source.
- que la simulation (modèle de dispersion) reproduise au mieux l'écoulement.
- Intégrer l'incertitude de la concentration au point de prélèvement.

Pour accéder à l'incertitude des points de prélèvement :

il a été retenu de faire les calculs de dispersion avec une rugosité très faible au niveau de l'étang (1.10⁻⁴) pour compenser les phénomènes potentiels de gaz lourds. Les concentrations arrivant sur les berges au nord de l'étang sont donc significatives. ADMS dispose d'un module dit Flowstar élaboré qui prend en compte les variations de relief et de rugosité, mais pour la partie dispersion, le calcul est fait de façon moins dynamique, homogène sur la verticale à partir de la rugosité de surface. Ceci peut entraîner une dilution un peu plus rapide en sortie de l'étang, notamment si des passages préférentiels existent.

Le landuse généré à partir du CORIN LAND COVER d'image satellite passe immédiatement de l'étang à une zone urbaine (rugo = 0.3). Or, plusieurs canisters sont prélevés entre la ville et l'étang. Cette zone intermédiaire constituée de quelques arbres en hiver, d'herbe rase et de surface type asphalte, peut avoir entraîné une dilution un peu rapide des concentrations, mais ne changera pas le flux.

A partir des premières habitations, la rugosité devient plus constante, par contre des chemins préférentiels entre les habitations existent (route). Les prélèvements en ville sont les plus compliqués à reproduire avec un code comme ADMS car il n'intègre pas le contournement des habitations.

Les calculs de RDM ont été conduits avec la source trapèze de 4250 m² pour chaque période avec la météorologie du moment de prélèvement.

La relation entre les différentes périodes est assurée par une fonction d'évolution type formule de la nappe fraîche pondérée par une estimation de l'état du tapis de mousse.

Pour la J01, différentes options de poids relatifs des canisters ont été testés, et dans tous les cas, la mesure de concentration intégrée sur l'école a servi de point de comparaison pour le calcul du flux global sur la période, avec bien sûr des hypothèses sur la répartition de la concentration intégrée entre J01 et J02.

Au total, trois CAS ont été étudiés :

- CAS 1 : calcul selon la formule de la nappe avec une rugosité de 0.005 m comme référence, et prise de valeur canister sans corrections (hormis incertitude direction). Pas de correction finale du flux par rapport à la mesure sur l'école. Emission moyenne Journalière : 54 g/s.
- CAS 2 : calcul selon la formule de la nappe avec une rugosité de 0.005 m comme référence, et prise de valeur canister sans corrections (hormis incertitude direction). Correction finale pour respecter le flux journalier de façon homogène en assimilant que la concentration du CAS2 sur l'école (220 µg/m³) représente en une journée la totalité du benzène cumulé sur le tube passif, soit 140 µg/m³, soit l'application d'un facteur final de division par 1.56 utilisé de façon homogène. Emission Journalière : 36 g/s.
- CAS 3 : calcul selon la formule de la nappe avec une rugosité de 0.2 m comme référence, et prise de valeur canister minorées à 50 % pour ne pas atteindre le débit d'arrivée du benzène. Le flux moyen journalier comparé sur l'école dépasse de 30 % la valeur moyenne J01 – J02. Emission moyenne Journalière : 22 g/s. Il s'agit du cas de la première version du rapport.

- Relief et la même rugosité variable avec pour la météorologie une hauteur de couche limite fixée à 50 m pour limiter l'expansion verticale du panache. Cela représente soit des phénomènes de blocage par inversion thermique locale, soit un diagnostic de l'expansion verticale ou de changement de rugosité mal géré par le modèle.

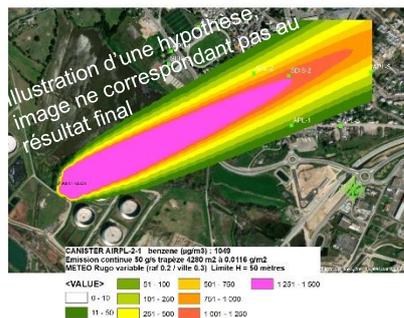


Figure 35 : concentration simulée avec émission 50 g/s période canister AIRPL 2-1 (rugosité variable et relief, et blocage vertical H = 50 mètres)

Dispersion pour les pics majoritaires : Comparaison aux canisters du 21/12/2022 23h50 au 22/12/2022 17H30 :

Pour la comparaison à la localisation du canister, on devra interpréter chaque carte de concentration avec la notion de distance à la source. La position du canister a été choisi par les pompiers / AIRPL pour se trouver sous le panache. Compte tenu de la sensibilité du nez humain, il est aisé de se positionner au centre du panache mais entre le moment où il est ouvert, la météorologie a pu un peu changer, donc tous les canisters n'ont pas forcément capté la concentration au cœur du panache.

Pour le prélèvement avec la plus forte concentration enregistrée (AIPL2-1), dans la simulation la plus majorante avec la rugosité faible eau, le panache n'est pas amené sur l'emplacement du capteur. La concentration simulée au droit du capteur est de 87 µg/m³ légèrement inférieure à 100 µg/m³. Alors qu'au cœur du panache à iso distance, elle atteint 1580 µg/m³.

L'estimation de l'émission sera donc comprise entre $50 * 1049 / 87 = 602$ g/s et $50 * 1049 / 1582 = 33$ g/s.

A contrario, l'utilisation d'une rugosité variable et du relief oriente mieux le panache sur l'emplacement du canister. La dilution est cependant plus importante du fait de la zone de raffinerie et de la ville qui sont mises à des rugosités certainement beaucoup plus hétérogènes que les valeurs retenues.

Le panache se rapproche nettement de la position du canister. La concentration simulée au droit du capteur est de 418 µg/m³.

Alors qu'au cœur du panache à iso distance, elle atteint 529 µg/m³.

L'estimation de l'émission sera donc comprise entre $50 * 1049 / 418 = 125$ g/s et $50 * 1049 / 529 = 99$ g/s.

On peut conclure que ce canister était pratiquement au cœur du panache compte tenu de l'orientation des vents et en intégrant un relief et un land use variable.

Si on enlève les valeurs d'émission élevées non réalistes (supérieure à la vitesse d'arrivée du benzène liquide à cet horaire env. 100 g/s sur figure 4), l'émission minimale devrait se situer entre 125 et 99 g/s pour une situation de tapis de mousse dégradée la nuit du 21 au 22/12.

ANNEXE Confrontation avec la perte en benzène pour le CAS 3 à J01 = 22 g/s :

Pour rappel, la quantité globale émise est de 5 027 kg de benzène.

En appliquant les corrections sur la formule de la flaque en présence d'une couche de mousse anti incendie plus ou moins bien en place, on calcule l'évolution de la quantité de Benzène dans la flaque.

A ce stade, les estimations sont une perte importante le JOUR1 (fort entrainement des HC par le vent, mise en place du dispositif de mousse rapidement dégradé par le fort vent) de l'ordre de 40 % à 60 % avec la présence de mousse, alors que le modèle de flaque à l'air libre estime la perte de 120 % du benzène en 24 h.

Le JOUR02 si l'on suppose une émission de l'ordre de 10 g/s le modèle adapté avec la présence de mousse efficace à plus de 85 % conserve encore 20 à 40 % du benzène total émise.

	PERTE à l'atmosphère (Kg)			
	moyenne MODEL (kg) MOUSSE DEGRADEE (50 %)	moyenne MODEL (kg) MOUSSE EN PLACE (85 %)	moyenne MODEL (kg) MOUSSE (50 – 85 %)	moyenne MODEL (kg) AIR LIBRE
JOUR1	3236	1150	1946	6215
JOUR2	3935	1181	1181	7870
JOUR3	1530	459	459	3059
JOUR4	580	174	174	1161

RESTE DANS LA FLAQUE (kg)

	moyenne MODEL (kg) MOUSSE DEGRADEE	moyenne MODEL (kg) MOUSSE EN PLACE (85 %)	moyenne MODEL (kg) MOUSSE	moyenne MODEL (kg) AIR
JOUR1	1,79E+03	3,88E+03	3,08E+03	-1,19E+03
JOUR2	-2,14E+03	2,70E+03	1,90E+03	-9,06E+03
JOUR3	-3,67E+03	2,24E+03	1,44E+03	-1,21E+04
JOUR4	-4,25E+03	2,06E+03	1,27E+03	-1,33E+04

% restant dans la flaque par rapport à la quantité émise

	moyenne MODEL (kg) MOUSSE DEGRADEE	moyenne MODEL (kg) MOUSSE EN PLACE	moyenne MODEL (kg) MOUSSE	moyenne MODEL (kg) AIR
JOUR1	35,64	77,13	61,30	-23,62
JOUR2	-42,62	53,65	37,82	-180,15
JOUR3	-73,04	44,52	28,69	-241,00
JOUR4	-84,59	41,06	25,23	-264,08

Tableau 6 : Estimation de la perte et de la quantité de benzène restante avec une efficacité de mousse majorée à 85 % de réduction.

La synthèse des émissions et des efficacités apparentes est reportée dans les tableaux suivants avec l'influence de l'exploitation des mesures.

Jour début	MOYENNE JOUR EMISSION BENZENE Modèle flaque avec mousse (reduc de 50 à 85 %)			Perte cumulée en Benzène Kg	Reste en Benzène Kg
	(g/s)	(g/s/m ²)	Kg/Jour		
J01 21/12 17:00	22,52	0,00530	1946	1946	3081
J02 22/12 17:00	13,54	0,00319	1170	3116	1911
J03 23/12 17:00	5,31	0,00125	459	3575	1452
J04 24/12 17:00	2,02	0,00047	174	3749	1278
J05 25/12 17:00	2,04	0,00048	176	3925	1102
J06 26/12 17:00	2,16	0,00051	187	4112	915
J07 27/12 17:00 → 28/12 07:00 (fin nappe)	14,09	0,00332	1218	5330	-303

Tableau 7 : moyenne journalière d'émission, perte et restant de benzène estimés avec formule de la flaque adapté avec facteur limitant de présence de mousse (50 à 85 %).

La prise en compte d'un facteur de réduction de l'entraînement du benzène relatif aux propriétés de la mousse permet de conserver du benzène au moins jusqu'au J06, puis il manquerait 300 kg de benzène (Tableau 7).

Les actions de pompage réduisant l'étendue de la flaque n'ont pas été prises en compte, ni l'amélioration de la qualité de couverture par les nouvelles épaisseurs et formulations de mousse. De fait, l'efficacité de réduction est une efficacité apparente par rapport au modèle de flaque de dimension définie.

Si on prend en compte la mesure sur l'école par tube de 15 jours, il ressort que la réduction de l'émission par l'amélioration des tapis de mousse serait supérieure à 89 %.

Si on utilise les mesures sur le chromatographe de la remorque, le tableau est modifié avec le facteur d'émission fixe à partir du J03 (23/12 17 h) avec des valeurs entre 0,42 à 1, 3 g/s en moyenne journalière déterminées précédemment (Tableau 7 : moyenne journalière d'émission, perte et restant de benzène estimés avec formule de la flaque adapté avec facteur limitant de présence de mousse (50 à 85 %)). Il reste alors du benzène dans la flaque pompée (Tableau 8).

Ceci est en adéquation avec l'hypothèse formulée sur la base de l'évolution des ratios entre COV sur la durée de l'évènement.

		MOYENNE JOUR EMISSION BENZENE			Perte à l'atmosphère cumulée en Benzène	Reste en Benzène	% apparent réduction versus formule flaue
		Modèle flaue avec mousse (reduc de 50 à 85 % J01 / 85 % J02) puis valeur moyenne RDM Analyseur BTEX par intégration +20 %					
Jour début		(g/s)	(g/s/m2)	Kg/Jour	Kg	Kg	%
J01	21/12/2023 17:00	22,52	5,26E-03	1946	1946	3081	0-50-85
J02	22/12/2023 17:00	10,29	2,40E-03	889	2835	2192	88,6
J03	3/12/2023 17:00	0,684	1,60E-04	59	2894	2133	98,1
J04	24/12/2023 17:00	1,293	3,02E-04	112	3006	2021	90,4
J05	25/12/2023 17:00	0,744	1,74E-04	64	3070	1957	94,5
J06	26/12/2023 17:00	0,48	1,12E-04	41	3112	1915	96,7
J07	27/12 17:00 → 28/12 07:00 (fin nappe)	0,42	9,81E-05	36	3148	1879	99,6

Tableau 8 : moyenne journalière d'émission, perte et restant de benzène estimés avec formule de la flaue adapté avec facteur limitant de présence de mousse, puis estimation d'émission journalière moyenne par comparaison avec les mesures Benzène et RDM majorée.