



setec  
tpi

# Intégration des bus au GNV dans un complexe de voiries souterraines

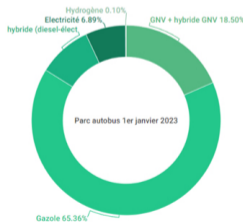
RésoFeux – 34<sup>èmes</sup> journées

S. DESANGHERE

12/09/2024

# Gaz naturel pour véhicule (GNV)

- Élément de la diversification des approvisionnements en carburant
- Diminuer notre dépendance énergétique vis-à-vis du pétrole
- Potentiel sur la réduction de l'effet de serre par rapport au pétrole
- Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (2015)
  - Proportion minimale d'autobus à faibles émissions pour les véhicules neufs
  - 50 % à compter du 1er janvier 2020
  - 100 % à compter du 1er janvier 2025



Source : Ministère de la Transition Énergétique

- Majoritairement composé de méthane ( $\text{CH}_4$ ,  $\Delta H_c \simeq 50 \text{ MJ/kg}$ )
- Forme compressée : GNC
- Forme liquéfiée : GNL

Caractéristique	Conditions ambiantes	GNC	GNL
État	Gazeux	Gazeux	Liquide
Pression	1 bar	200 bars	1 bar
Température	20 °C	20 °C	- 162 °C
Masse volumique	0,65 kg/m <sup>3</sup>	131 kg/m <sup>3</sup>	422 kg/m <sup>3</sup>
Densité énergétique	0,032 MJ/l	6,5 MJ/l	20,8 MJ/l
	1 200 fois moins que le GO	5,8 fois moins que le GO	1,8 fois moins que le GO

Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

- Une dizaine de bouteilles d'environ 150 litres ( $\simeq 20$  kg) chacune
- Positionnées en partie haute



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

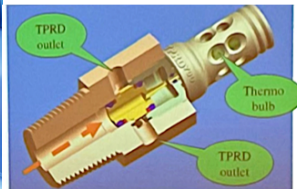
Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

- Pression maximale avant éclatement : de 450 à 730 bars
- TPRD : « thermal pressure relief device »
  - Élément thermosensible qui éclate lorsqu'il atteint  $110\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

# Position réglementaire en tunnel

- IT datant de 2000 : pas prévue pour les véhicules GNV !
- Précaution : bus GNV assimilé à un véhicule TMD
  - Possible seulement tant que le parc est insignifiant
  - La plupart des exigences TMD n'ont aucun effet pour réduire les conséquences d'un incendie de bus GNV, par ex :
    - Pentes transversales des chaussées
    - Caniveau à fente continue
    - Ventilation dimensionnée pour gérer un incendie de 200 MW pendant plusieurs dizaines de minutes
  - **Il faut imaginer de nouvelles solutions pour atténuer les risques :**



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

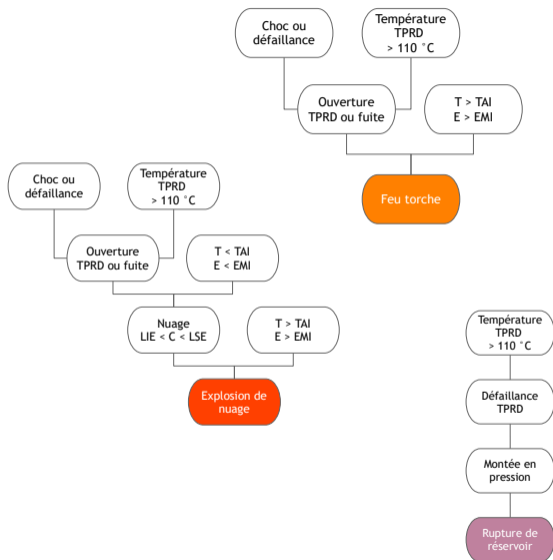
Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

# 3 types de risques avec le GNC en bouteille

- Feu torche
- Rupture du réservoir
- Explosion de nuage



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

## Risques associés à l'introduction de bus fonctionnant au GNV dans un complexe de voiries souterraines ?

- Cibles
  - Public
  - Secours
  - Infrastructure
- Démarche
  - Type « étude spécifique des dangers »
  - Estimation des conséquences des phénomènes dangereux associés au GNV  
⇒ Modélisation numérique



- **Activation du TPRD**

- Modèle de HESKESTAD

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_g - T) \quad (1)$$

- RTI  $\simeq 25$  a été décrit dans la littérature

- Dépend de la technologie du TPRD

- Ouverture lorsque  $T = 110$  °C

- Des questions demeurent :

- Modèle purement convectif : influence du rayonnement ?
- Effet du capotage autour des bouteilles ?
- Effets dominos ?

Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

# Modélisation FDS du feu torche

- Vidange de la bouteille
- Jet supersonique en sortie

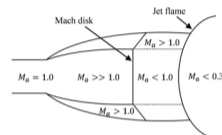
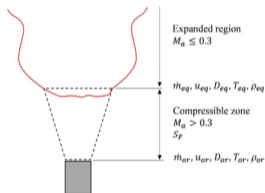


Fig. 2. Schematic representation of the under-expanded structure of sonic jet fires

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$$\dot{m} = C_d A p_0 \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{M}{RT_0} \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

Vidange isentropique

# Modélisation FDS du feu torche

- Vidange de la bouteille
- Ordres de grandeur
  - Vidange du réservoir en environ 3 min, chute de la pression de 200 à 100 bar en environ 30 s
- Modèle « d'ingénieur » ultra simplifié : principe de BERNOULLI
  - Évolution de la masse dans la bouteille

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (2)$$

- Détente supposée isotherme

$$\boxed{\frac{dm}{dt} = -\frac{mS}{V} \sqrt{\frac{2RTZ}{M}}} \quad (3)$$

- Solution analytique de l'équation (3)

$$m(t) = m_0 \exp(-t/\tau) \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{M}{2RTZ}} \quad (4)$$

Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

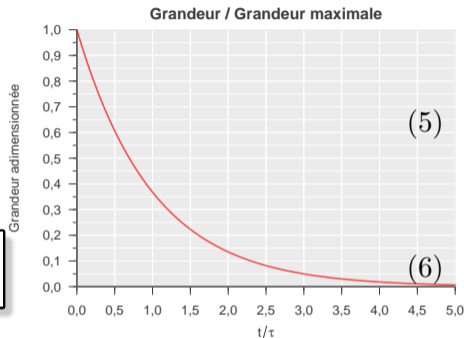
- Vidange de la bouteille
- Décroissance exponentielle

$$p(t) = p_0 \exp(-t/\tau)$$

$$\text{HRR} = \text{HRR}_{\max} \exp(-t/\tau)$$

$$\text{HRR}_{\max} = -\Delta H_f \left. \frac{dm}{dt} \right|_{t=0} = -\Delta H_f \frac{m_0}{\tau} \quad (7)$$

- $\tau \simeq 45$  s pour passer de 200 à 100 bars en 30 s
- Puissance maximale  $\simeq 20$  à 30 MW selon  $m_0$



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

- **Flamme torche**
- Approche « spray burner »
- Objectif
  - Injecter la puissance thermique voulue
  - Retrouver la longueur de flamme ( $\simeq 12$  m pour 30 MW)
- Injection d'un combustible liquide
  - Débit injecté
  - Taille des gouttes
  - Orientation et vitesse initiale de gouttes
- Impact sur les solides ?



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

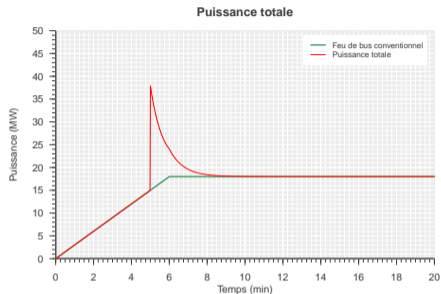
Tendances

Conclusion



# Modélisation FDS du foyer

- Feu de bus



- Superposition des flammes torches



- Contexte
- Technologie
- Réglementation
- Risques
- Modélisation
- Mise en œuvre
- Tendances
- Conclusion

- Instant d'activation des TPRD



- Effet du sprinklage



- Effets à distance dans un complexe souterrain



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

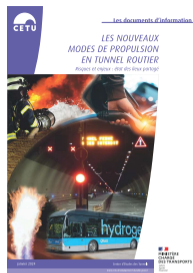
Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

# Conclusion

- Réelle prise de conscience du sujet
- Modélisation numérique incontournable
  - Éclairage intéressant, au moins qualitativement
  - Un bon moyen pour analyser au cas par cas (ESD)
- Un grand nombre de phénomènes complexes en interaction
- Un comportement très « techno-dépendant »
- Besoin de bons essais à échelle réelle (+ effet du confinement)



- Contexte
- Technologie
- Réglementation
- Risques
- Modélisation
- Mise en œuvre
- Tendances
- Conclusion



Contexte

Technologie

Réglementation

Risques

Modélisation

Mise en œuvre

Tendances

Conclusion

[sylvain.desanghere@setec.com](mailto:sylvain.desanghere@setec.com)