

# Traitement thermique des LNAPL:

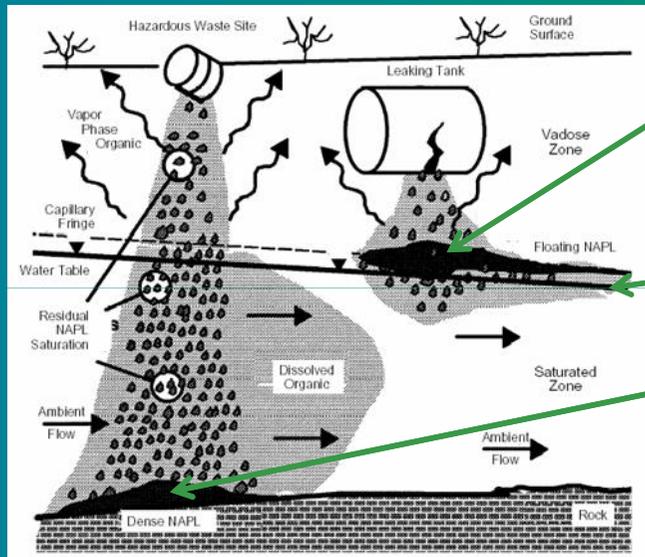
## Application du procédé NSR City®



# LNAPL & DNAPL

- ✚ NAPL (Non-Aqueous-Phase-Liquid) : Phase liquide non aqueuse
- ✚ Light (LNAPL): tout produit plus léger que l'eau (densité  $<1$ )  
(ex. produits de pétrole : gazole, essence, huile moteur,...etc.)
- ✚ Dense (DNAPL): tout produit plus dense que l'eau (densité  $>1$ )  
(ex. Perchloroéthylène (PCE), Trichloroéthylène (TCE),...etc.)

# LNAPL & DNAPL



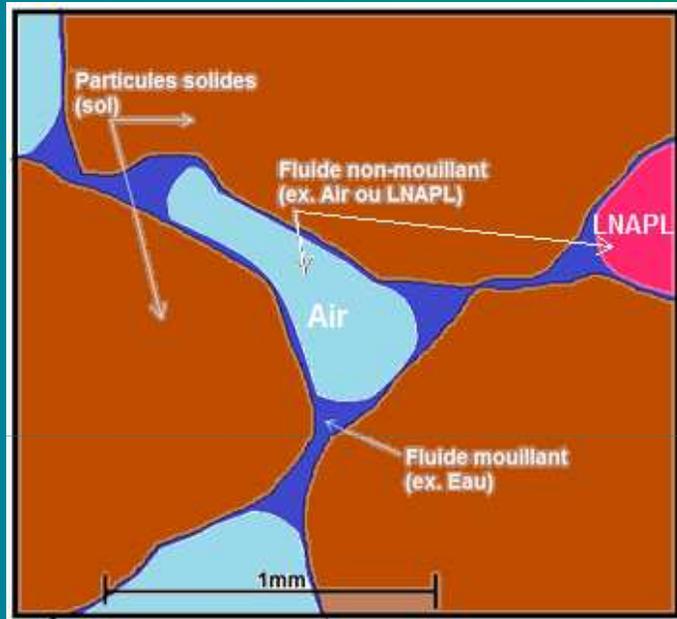
LNAPL: plus léger que l'eau, il se dépose sur la nappe. Solubilité dans l'eau → Quantité dissoute → Niveau de contamination de la nappe

Nappe

DNAPL: plus dense, il continue à descendre jusqu'à couche imperméable (ex, Argile). Solubilité dans l'eau → Quantité dissoute → Niveau de contamination de la nappe

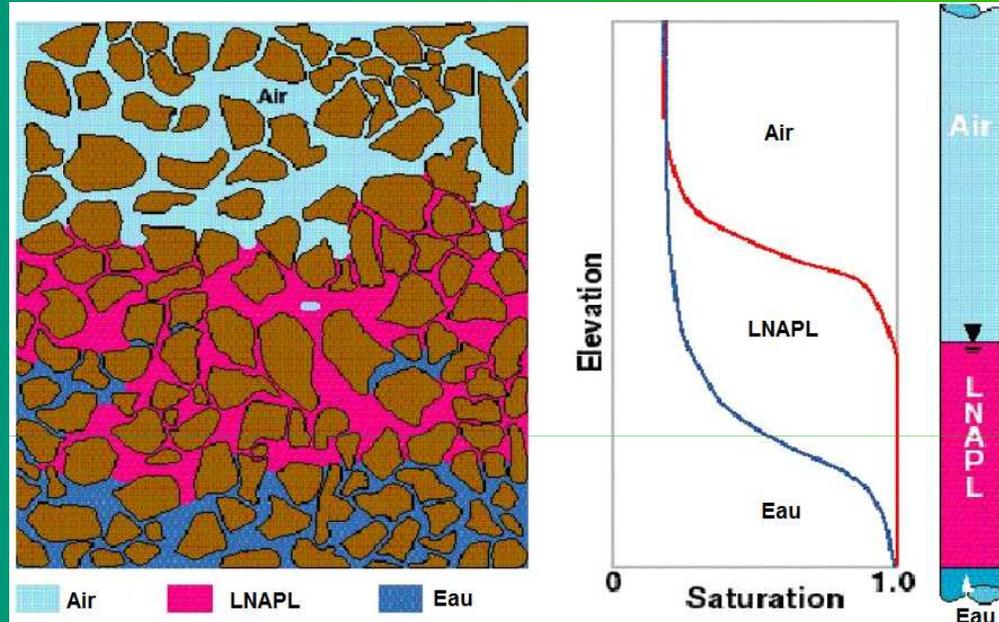
# LNAPL

## Zone non-saturée du sol (Vadose)



- L'eau (fluide mouillant) occupe généralement les petits pores et couvre la surface des particules
- LNAPL occupe généralement les pores les plus volumineux

## Zone saturée du sol (Nappe)



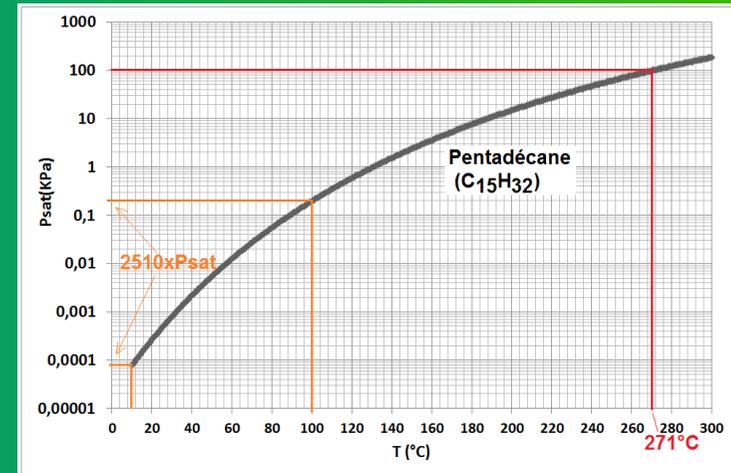
- LNAPL « flotte » sur l'eau de la nappe (couche flottante) mais peut aussi être emprisonné (sous forme de poches séparées) dans la zone saturée si fluctuation de la nappe.

# Pourquoi le pompage et l'excavation ne donnent généralement pas souvent des résultats satisfaisants ?

- ✚ LNAPL piégé sous forme de poches séparées et immobiles dans la zone saturée du fait de la fluctuation saisonnière de la nappe (sur une saison), → Récupération de ces poches par pompage quasi impossible.
- ✚ Viscosité élevée et densité faible pour la plupart des LNAPL → faible mobilité = pompage lent.
- ✚ Affinité pour la matrice → faible mobilité + forte proportion de produit ne pouvant être récupéré gravitairement (produit « lié » à la matrice).

# Quels sont les effets du chauffage du sol sur LNAPL?

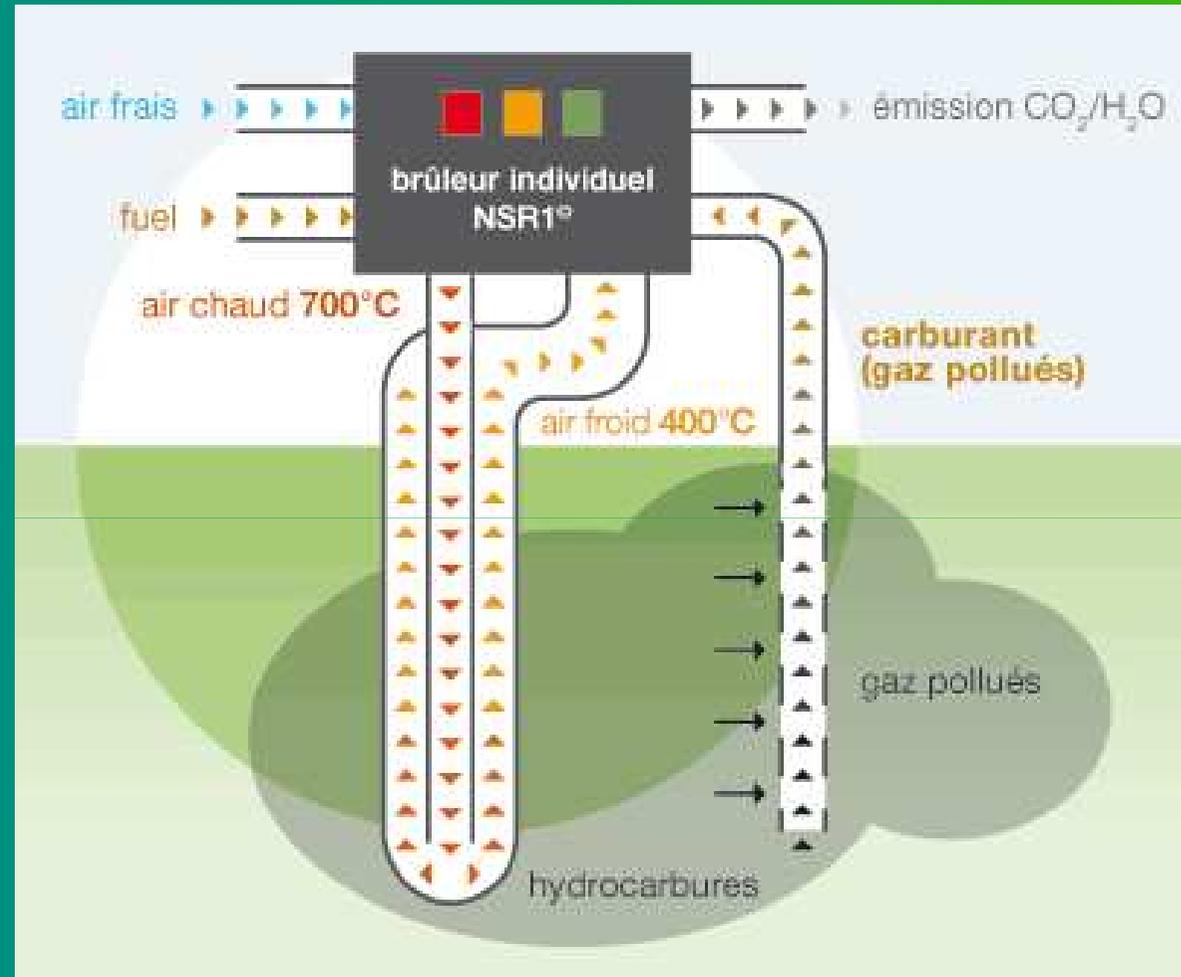
- La pression de vapeur augmente avec la température: chauffage du sol de 20 à 100°C → déplacement équilibre liquide → vapeur (ex. Pentadécane:  $P_{\text{sat}}(100^\circ\text{C})=2510 \times P_{\text{sat}}(10^\circ\text{C})$ )



- Mélange azéotrope (LNAPL/Eau): ex. un mélange (86,5%/13,5%) de toluène (Téb=110°C) et d'eau (Téb=100°C) bout à 84,1°C.
- Les coefficients d'adsorption sont réduits pendant le chauffage → Dégagement du LNAPL de la matrice de sol ou de la roche.

**Ainsi, la récupération de LNAPL est plus aisée à  $T > T_{\text{amb}}$ .**

# Technologie NSR: Comment ça marche?



# Technologie NSR: Comment ça marche?

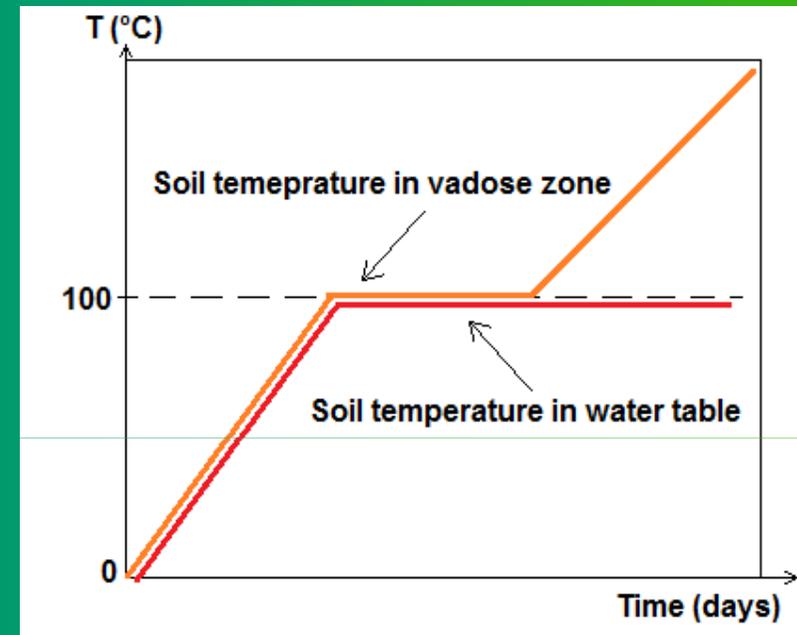
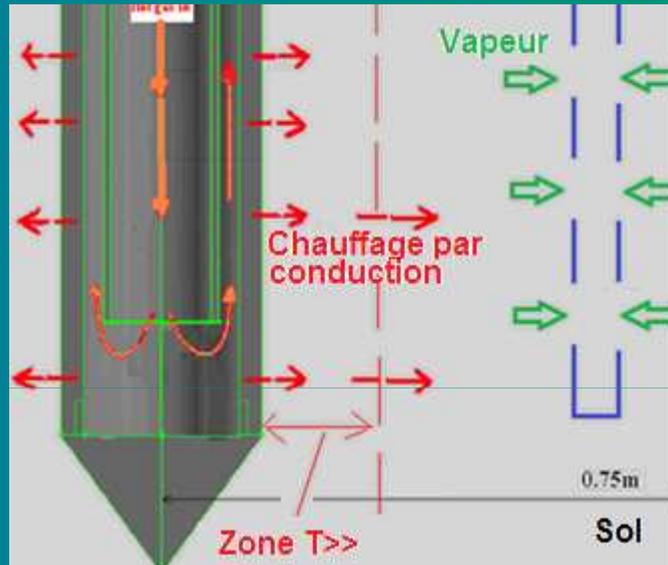
Flux de chaleur par conduction:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Sol	Conductivité thermique ( $\lambda$ ) [W/mK]	Perméabilité intrinsèque (k) [m2]
Argile (sec)	0,6	$10^{-16}$ - $10^{-20}$
Argile saturée en eau	1,4	
Sable	0,5	$10^{-10}$ - $10^{-12}$
Sable saturée en eau	2,3	
Gravier fin	0,4	$10^{-7}$ - $10^{-9}$
Gravier fin saturée en eau	1,7	

$\lambda_{\text{Sable,saturé}} / \lambda_{\text{Argile,sec}} = 3,8$  et  $k_{\text{Sable}} / k_{\text{Argile}} = 100$  millions

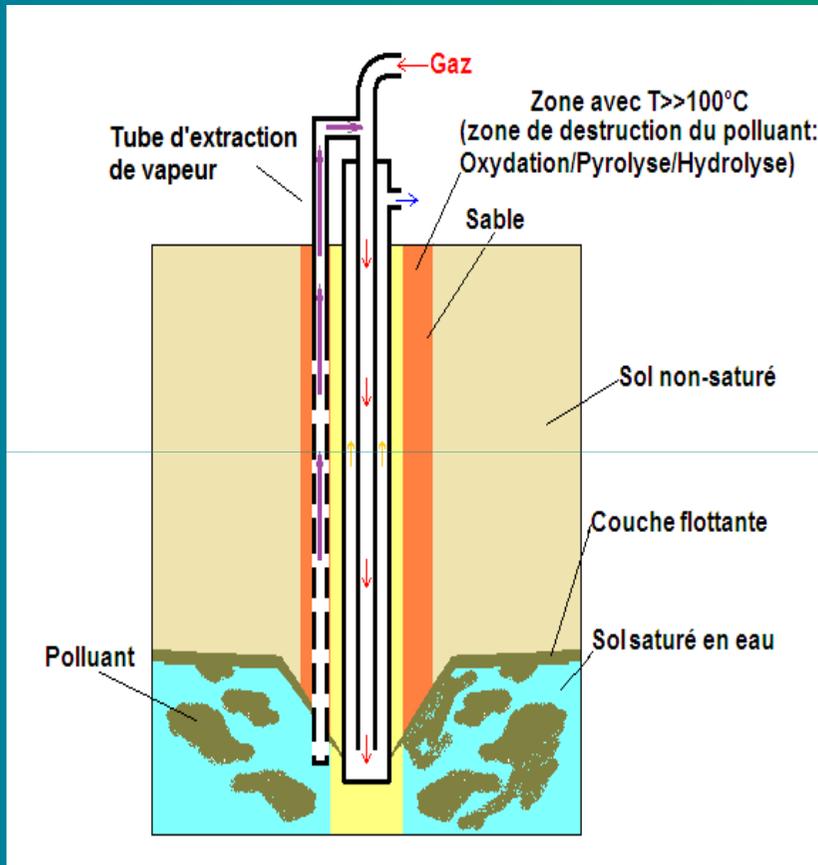
# Technologie NSR: Comment ça marche?



Zone vadose : 3 phases de traitement,  
Zone saturée : 2 phases.

En savoir plus sur [http://www.gts.fr/download/site-principal/document/gts\\_tps\\_description-du-procede-nsr.pdf](http://www.gts.fr/download/site-principal/document/gts_tps_description-du-procede-nsr.pdf)

# Mécanismes de traitement de LNAPL



Dans la nappe deux zones sont créées:

- Zone de haute température près du tube ( $T \gg 100^\circ\text{C}$ )

Oxydation:



Pyrolyse :



Hydrolyse:



- Zone à température modérée ( $T=100^\circ\text{C}$ )

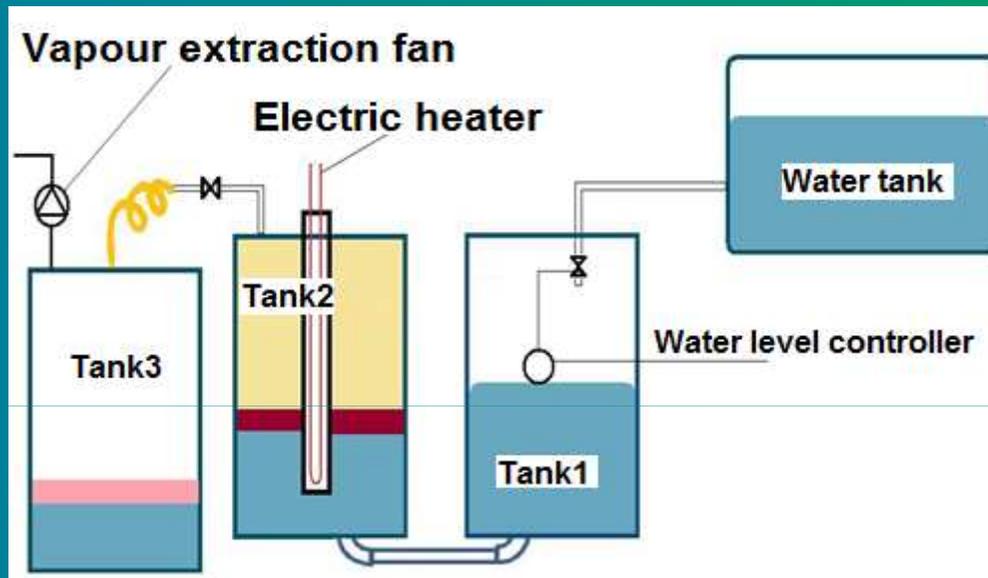
Évaporation (extraction à la vapeur d'eau)

# Test pilote de traitement de LNAPL (gazole) par désorption thermique



# LNAPL : Test de désorption thermique

Sol : sable (390kg) ; LNAPL : gazole (9kg) → Couche flottante de 10cm



- Mesures:
- Température
  - Pression
  - Analyse des gaz ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $C_xH_y$ )

# LNAPL : Test de désorption thermique (Résultats)

✚ Période de traitement : 29 jours

✚ Température de chauffage et du sol:

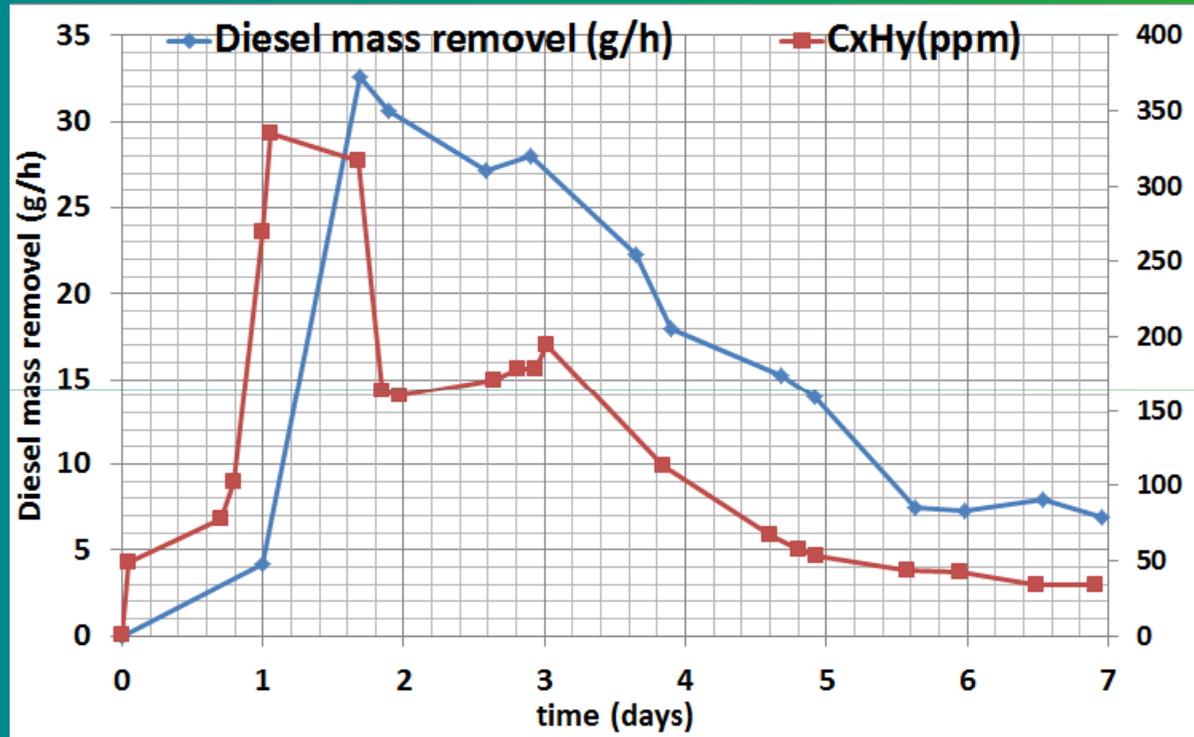
temps	T-résist. (°C)	T-parois résist. (°C)	T-Sol (°C)
2 jours	450	330	80
5 jours	500	350	100
22 jours	500	324	100

✚ Phase1 : ~2 jours → Température du sol croît jusqu'à 100 C (ébullition de l'eau),

✚ Phase2 : 27 jours → Température du Sol stable à 100 C (excepté zone haute température) → Toute l'énergie fournie sert à évaporer l'eau et le contaminant.

# LNAPL : Test de désorption thermique (Résultats)

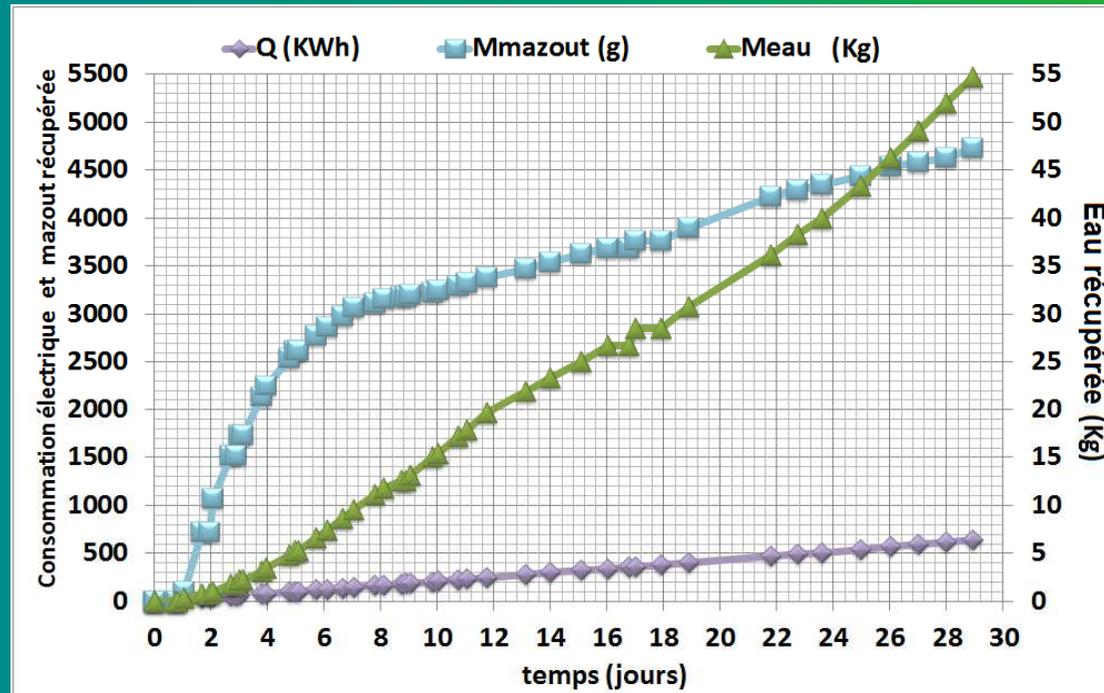
Vitesse d'évacuation du gazole et quantité de vapeur (HC) présente dans les gaz:



Vitesse élevée les 2 premiers jours → Évaporation des coupes légères du gazole

# LNAPL : Test de désorption thermique (Résultats)

Quantités totales d'énergie consommée et quantités de gazole et d'eau récupérées par condensation:

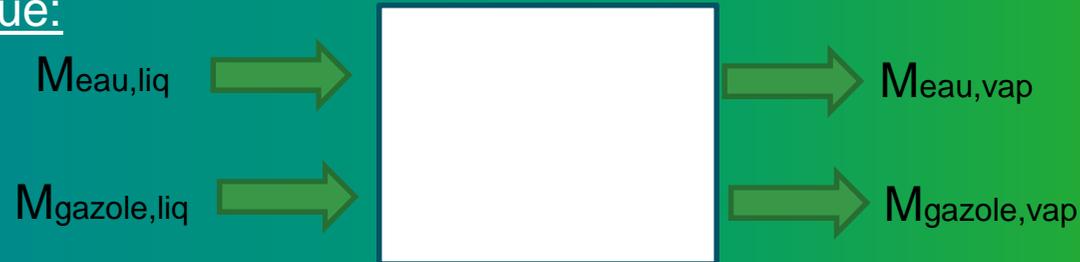


En moyenne:

- 28L d'eau → 1L de gazole évacué
- 55KWh par Kg de gazole évacué

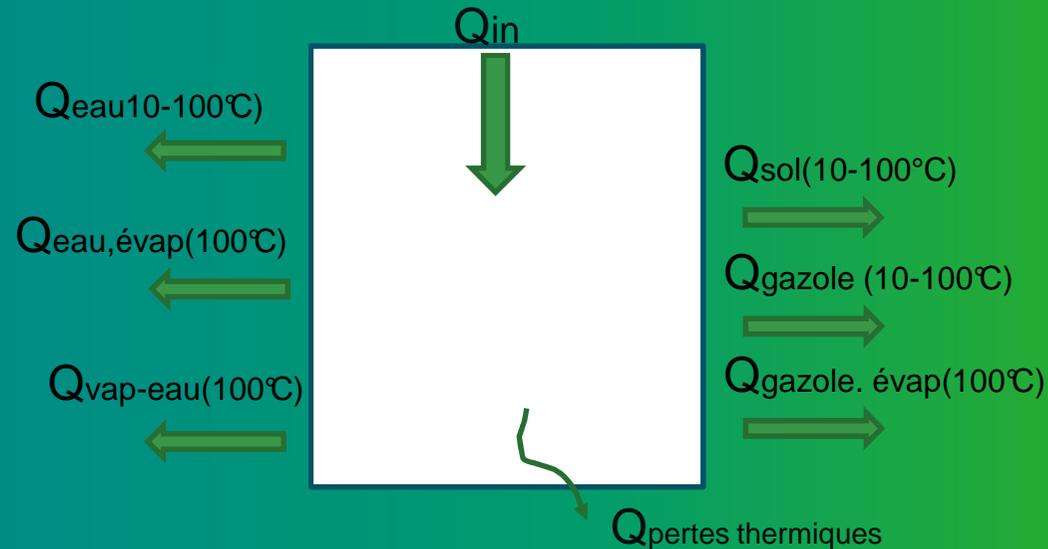
# LNAPL : Test de désorption thermique (Résultats)

## Bilan massique:



+ Quantité initiale de gazole : 9kg → élimination en 29 jours

## Bilan énergie:



Quantité d'énergie totale consommée après 29 jours :  
642kWh (équivalent gazole: 45kg)

# Conclusions

Le test effectué au laboratoire démontre que:

- Le gazole (LNAPL) est totalement éliminé par désorption thermique (29 jours de traitement),
- La distillation à la vapeur d'eau est le mécanisme prépondérant du traitement,
- Après 29 jours de chauffage : plus de 60% du gazole est récupéré sous forme liquide. La quantité restante (40%) est détruite dans la zone à haute température (près du tube de chauffage),
- L'énergie utilisée pour récupérer le gazole est de 55 kWh/kg de gazole,
- Le pouvoir calorifique du gazole présent dans le sol représente 22% de l'énergie totale utilisée pendant le traitement.