

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

OPTIMISATION DE L'ABSORPTION ACOUSTIQUE D'UN REVÊTEMENT ROUTIER ET DE SA PERMÉABILITÉ

Cerema Est, agence de Strasbourg, projet dBMiP

23/06/2026

ALEXIA PELTIER
alexia.peltier@cerema.fr

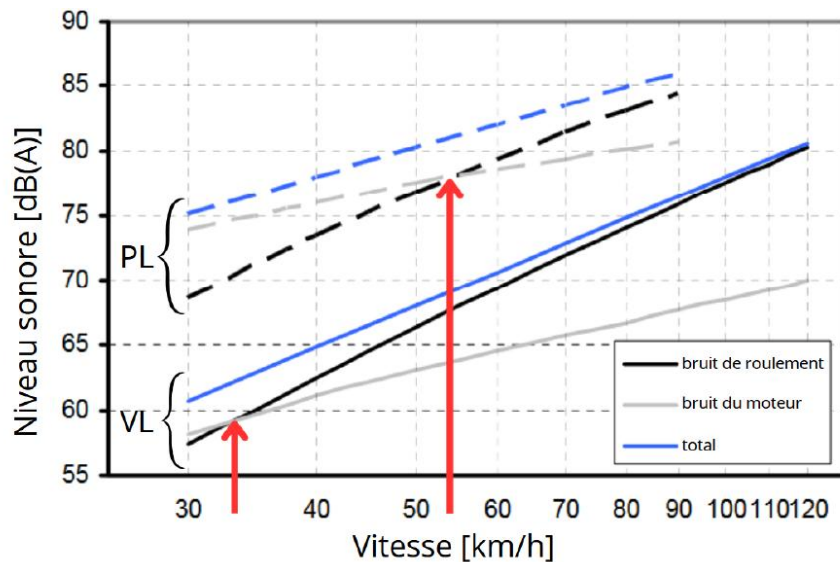
CONTEXTE

LE BRUIT ROUTIER EST LA PRINCIPALE SOURCE DE NUISANCE SONORE EN FRANCE.

European Environment Agency, 2022

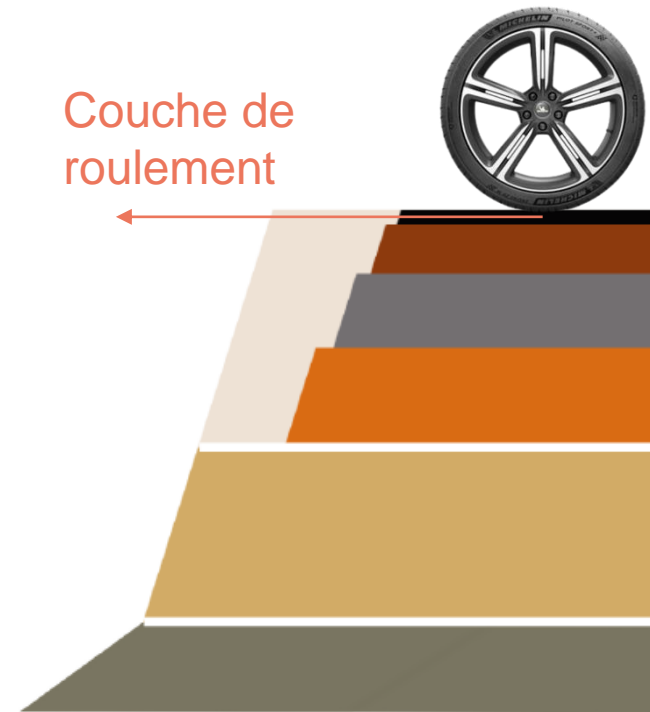
BRUIT DE ROULEMENT

BRUIT DE MOTEUR



- phénomènes mécaniques
- phénomènes aérodynamiques
- effets amplificateurs

Couche de roulement



Contribution du bruit de roulement et du bruit des véhicules thermique légers (VL) et poids lourds (PL)

G.P. van Blokland et al. Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise. Rapp. tech. 2005

GESTION DES EAUX

- Désimperméabiliser les sols
- Contrôler les ruissellements



SOLUTIONS

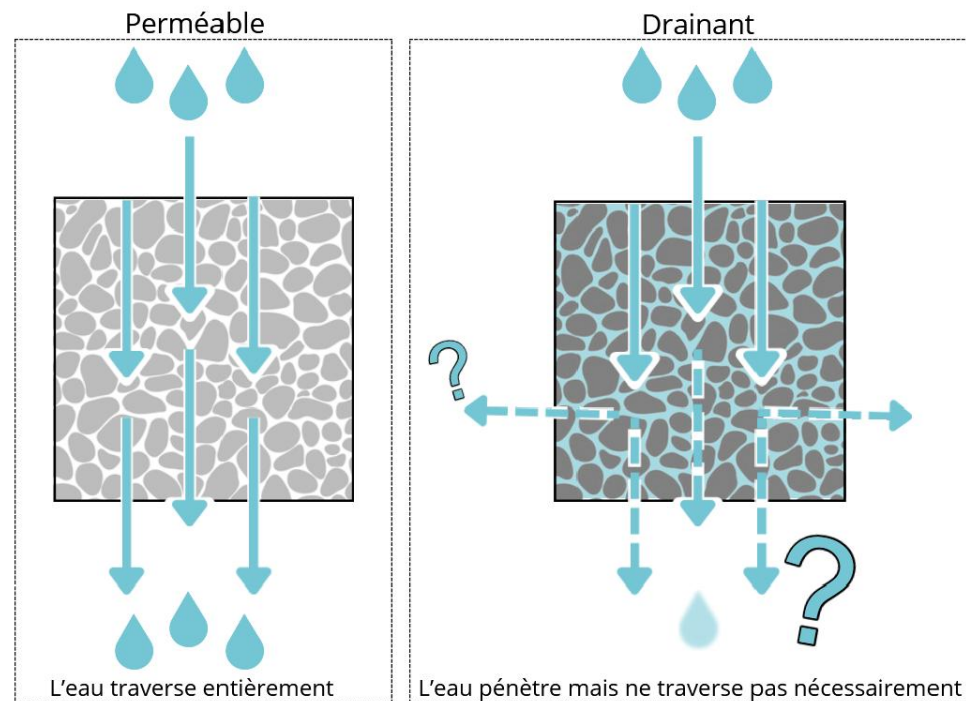
- Béton bitumineux drainants
- Chaussées poreuses urbaines

DOUBLE ENJEU :

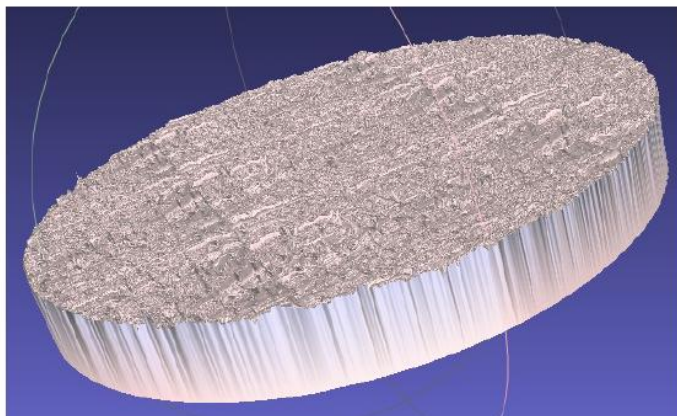
- Réduire le bruit de roulement
- Garantir une bonne gestion des eaux pluviales

LIMITES

- Peu d'études conjointes
- Difficile à caractériser directement sur le terrain

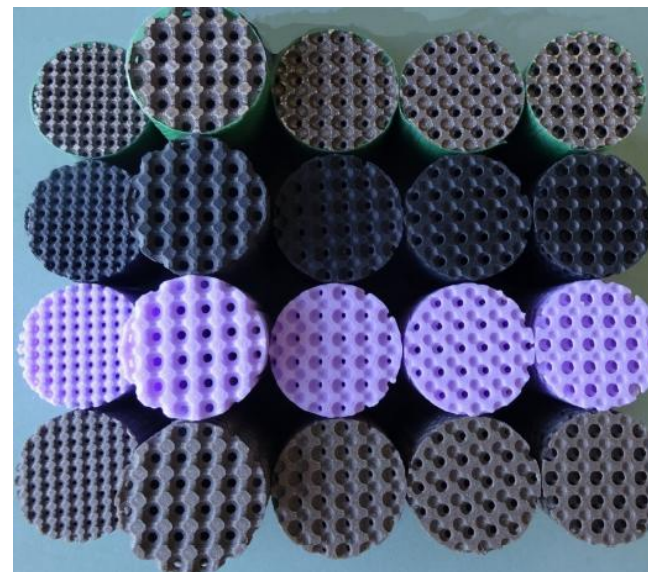


L'IMPRESSIION 3D



Modélisation de l'éprouvette sans modification de texture

Carole Viala. "Propriétés des revêtements pour l'usage de plastiques recyclés dans les revêtements de chaussée". 2023



Séries d'échantillons imprimés par diverses imprimantes et résines

Tomasz G. Zielinski et al "Reproducibility of sound-absorbing periodic porous materials using additive manufacturing technologies : Round robin study". 2020

Comment exploiter **l'impression 3D** pour concevoir, tester et optimiser la microstructure de revêtements routiers afin **d'améliorer simultanément** leur **absorption acoustique** et leur **perméabilité à l'eau** ?

DÉFINITION DES PARAMÈTRES

Porosité :

Ensemble des vides (pores) d'un matériau

$$\phi = \frac{V_{air}}{V_{total}} = 1 - \frac{V_{solide}}{V_{total}}$$

$$0 \leq \phi \leq 1$$

Tortuosité:

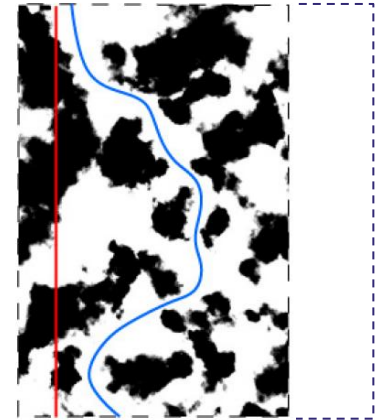
Complexité des chemins empruntés par les ondes acoustiques

$$\alpha_{\infty} \approx \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2$$

l_1 l'épaisseur du matériau

l_2 la longueur effective du chemin parcouru

$$1 \leq \alpha_{\infty}$$



Source : apmr

Résistivité :

Aptitude d'un matériau poreux à s'opposer au passage d'un fluide

$$\sigma = \frac{-\vec{\nabla}p}{\phi \vec{v}}$$

$\vec{\nabla}p$ le gradient de pression

\vec{v} la vitesse moyenne du fluide

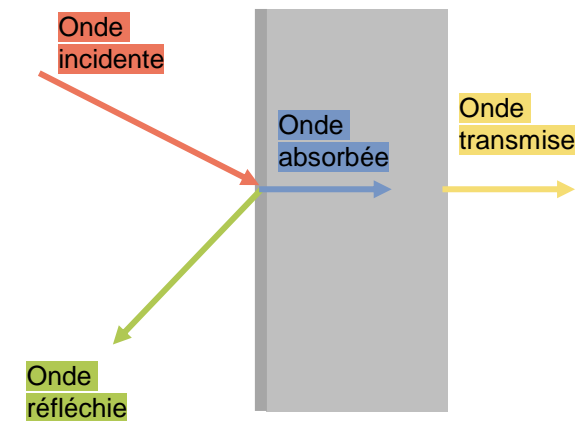
Coefficient d'absorption :

Capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'une onde sonore

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

0 = aucune absorption

1 = absorption complète



Coefficient d'absorption :

Capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'une onde sonore

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

0 = aucune absorption

1 = absorption complète

*Gaëlle Benoît.
"Caractérisation des propriétés acoustiques de revêtements poreux par mesures in situ - Application au colmatage des chaussées". 2013*

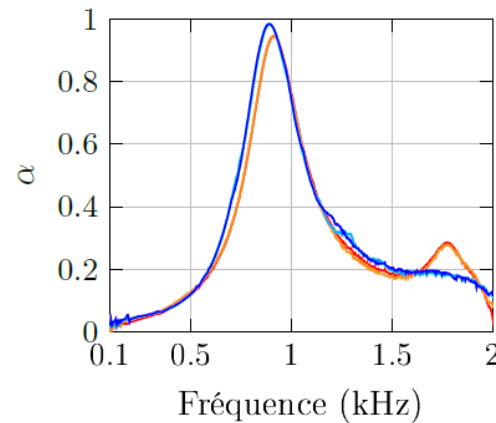


(a) Revêtement 1

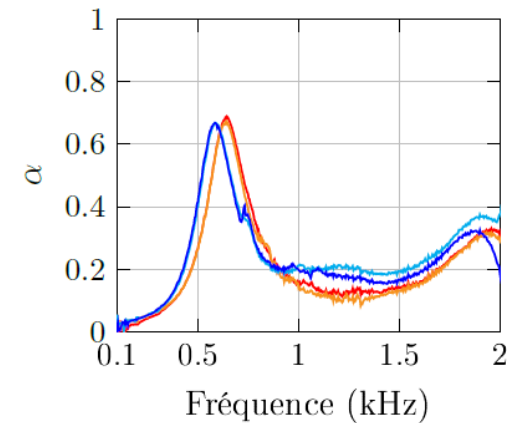


(b) Revêtement 2

Figure III.11 – Carottes de revêtements poreux utilisées pour les mesures au tube d'impédance



(a) Revêtement 1



(b) Revêtement 2

Figure III.12 – Coefficient d'absorption des deux échantillons de revêtement poreux, face A — et face B —

CARACTÉRISATION

ESSAIS DE PERMÉABILITÉ
ESSAIS ACOUSTIQUES
ESSAIS SUR LES MODÈLES

MODÉLISATION

DÉVELOPPEMENT DU CODE DE MODÉLISATION
MISE AU POINT IMPRESSION 3D
OPTIMISATION DU CODE
FABRICATION DES ÉPROUVETTES

ANALYSE

CORRÉLATIONS
ANALYSE
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

MATERIAUX REELS



PRODUCTION

Les échantillons en résine

Échantillons fabriqués
Application : laboratoire

100mm de
diamètre



MATERIAUX REELS

Un enrobé poreux

Échantillons prélevés

Application : cour d'école,
voie cyclable

150mm de
diamètre



100mm de
diamètre



40mm de
diamètre



30mm de
diamètre



Un Béton Bitumineux Très Mince

Échantillons carottés

Application : réseau routier

100mm de
diamètre



PRODUCTION

Les échantillons en résine

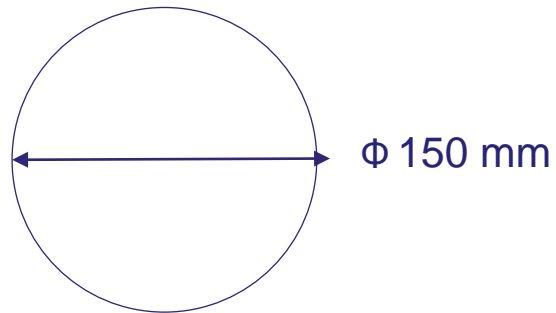
Échantillons fabriqués

Application : laboratoire

100mm de
diamètre

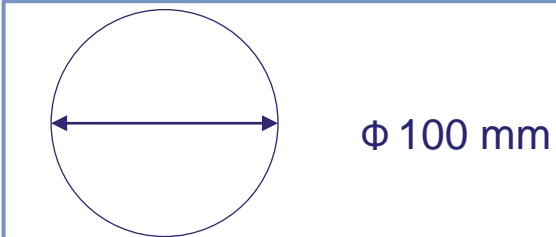


PERMÉAMÈTRE

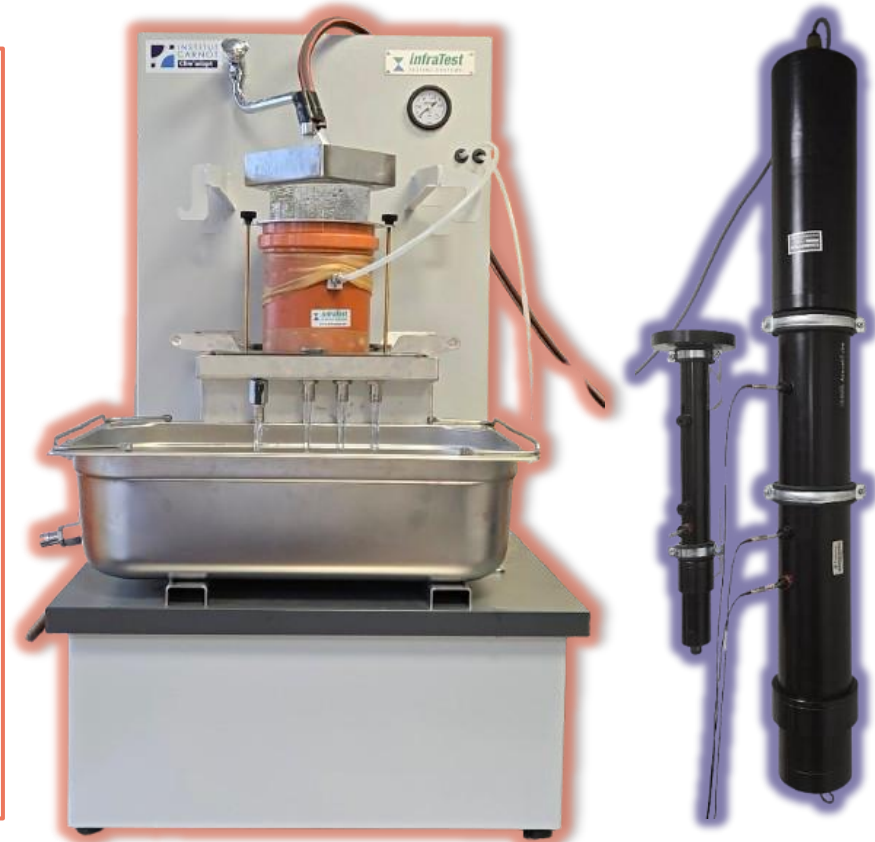


TUBE DE KUNDT

RÉSISTIVIMÈTRE



PYCNOMÈTRE



Protocole :

Norme NF EN 12697-19

Conductivité hydraulique (m/s) → Débit (m³/s)

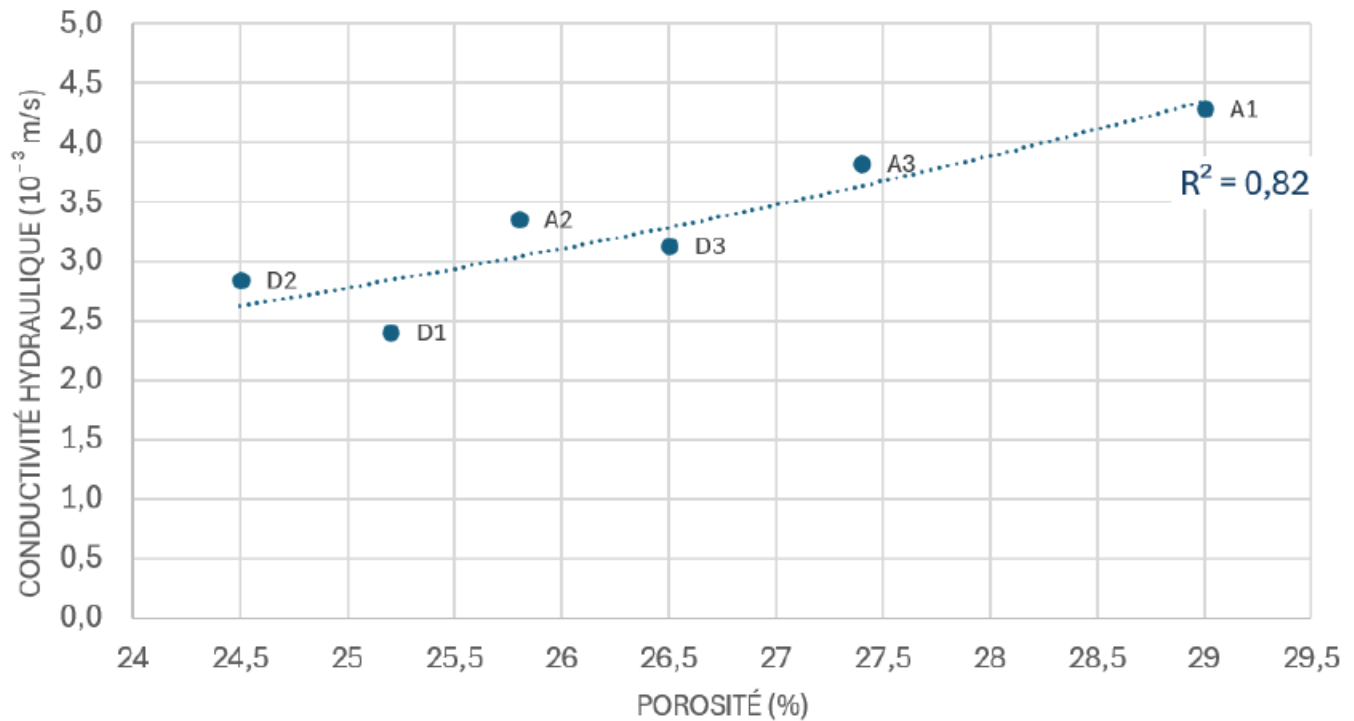
$$K_v = \frac{4 \times Q_v \times l}{h \times \pi \times D^2}$$

Épaisseur de l'éprouvette (m)

Hauteur de la colonne d'eau (m) → Diamètre de l'éprouvette (m)

- 5 répétitions sur chaque échantillon avec un temps d'essai de 60s
- Les échantillons sont testés sur leurs deux faces si possible



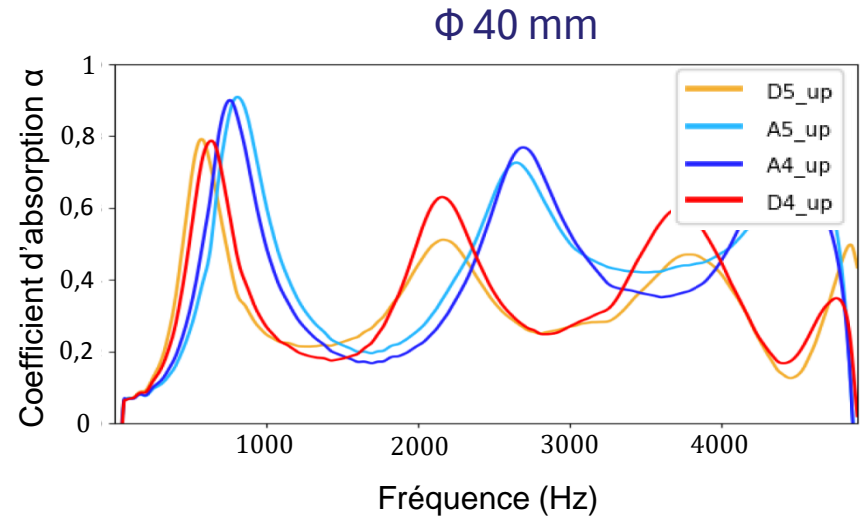
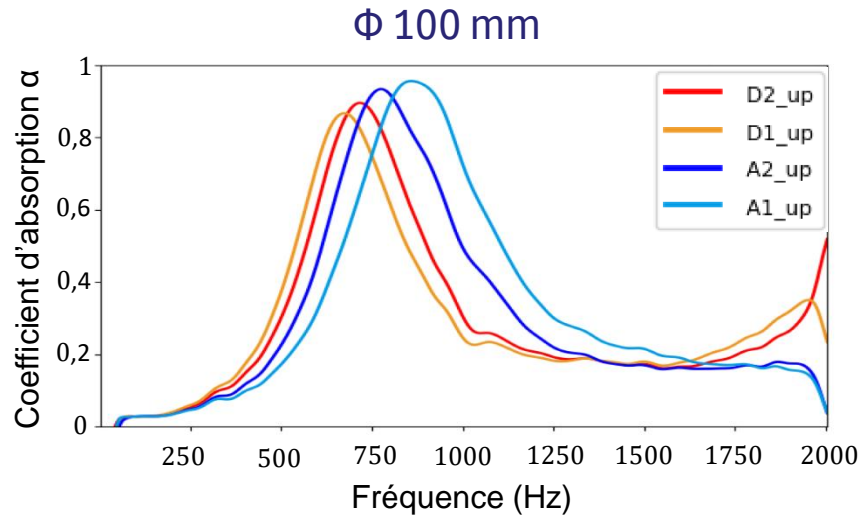


Relation entre la porosité et la perméabilité à l'eau des enrobés poreux



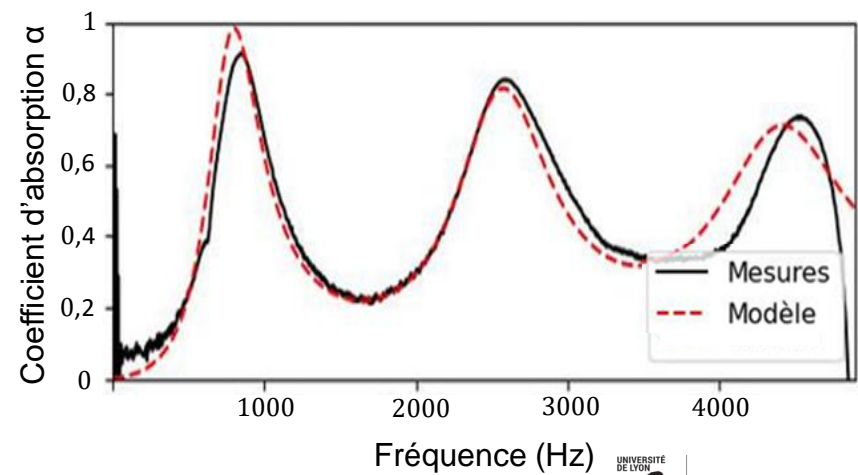
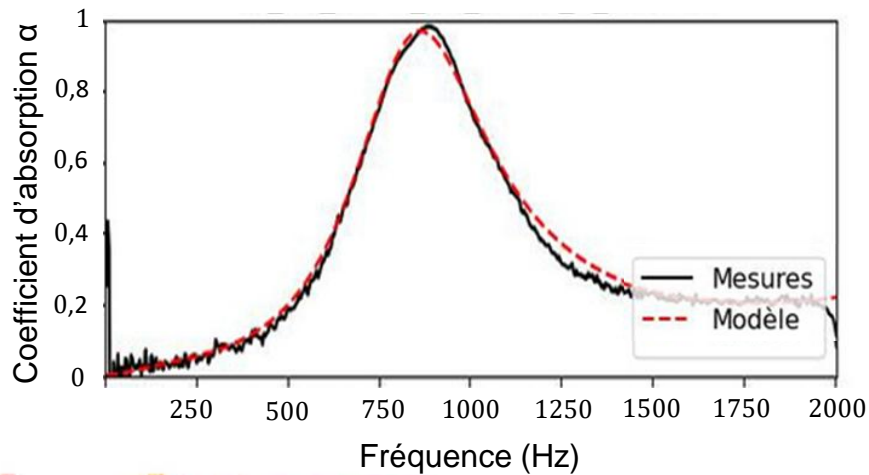
LA POROSITÉ EST UN PARAMÈTRE CLÉ POUR LA PERFORMANCE HYDRAULIQUE DES REVÊTEMENTS POREUX.

MESURE AU TUBE D'IMPÉDANCE SUR L'ENROBÉ POREUX



MODÈLE JCAL (JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD-LAFARGE)

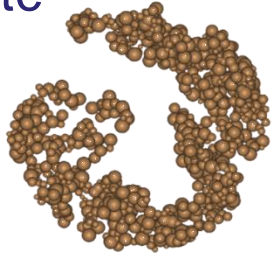
Denis Lafarge Jean F. Allard Pavel Lemarinier. "Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies". 1997



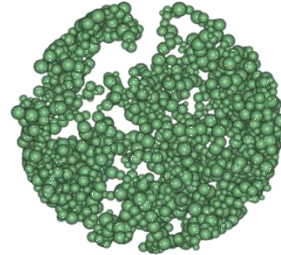
PARAMÈTRES ET NOMENCLATURE

Porosité

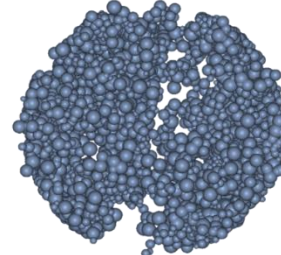
10%
P1



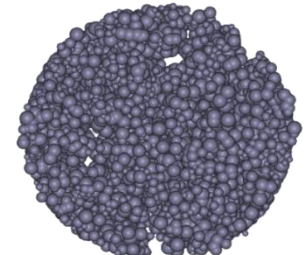
20%
P2



30%
P3

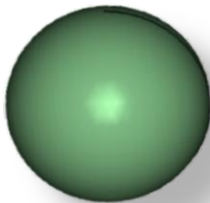


40%
P4

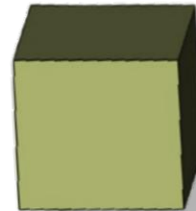


Forme des pores

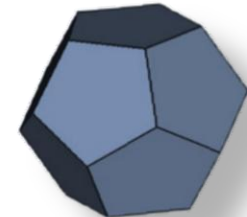
sphérique
F1



cubique
F2

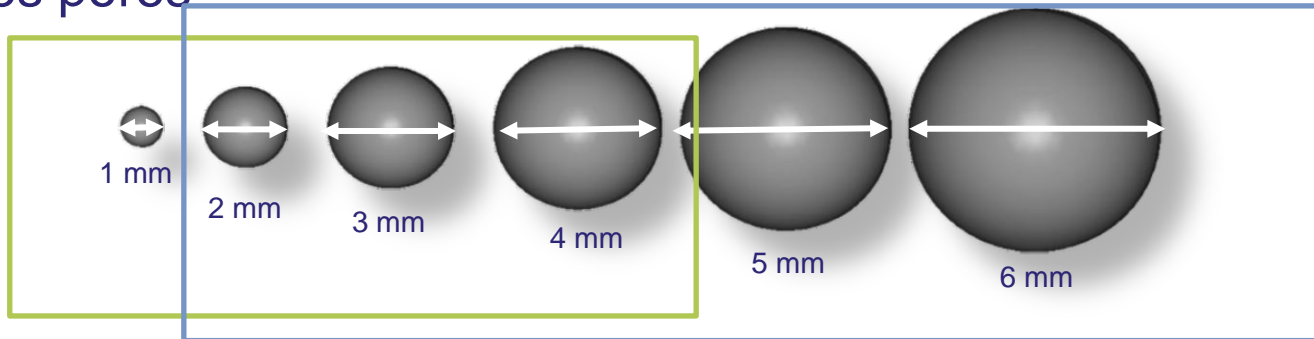


dodécaédrique
F3



Taille des pores

[1;4] mm
T1

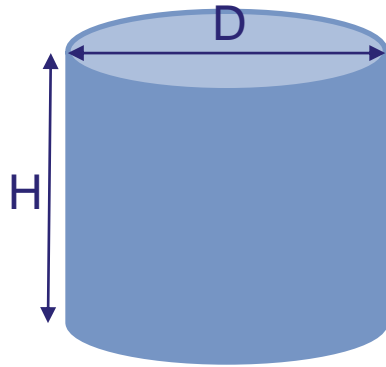


[2;6] mm
T2

SOLUTION RETENUE

 spyder $D = 100$ $H = 50$

Porosité
Taille des
pores



Placement des sphères suivantes
tant que la coordonnée verticale
reste positive ($z \geq 0$) :

1. Tirage d'un rayon aléatoire
2. Connexion contrôlée
3. Placement spatial
4. Vérification du placement

Export des coordonnées
(x, y, z, r) des sphères



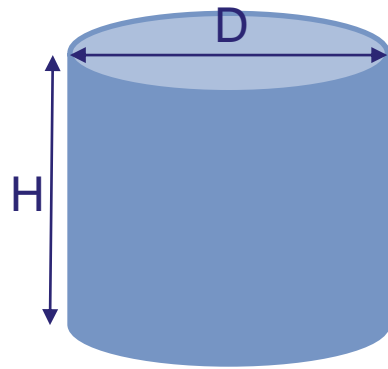
SOLUTION RETENUE

 **spyder**

$D = 100$

$H = 50$

Porosité
Taille des
pores



Placement des sphères suivantes tant que la coordonnée verticale reste positive ($z \geq 0$) :

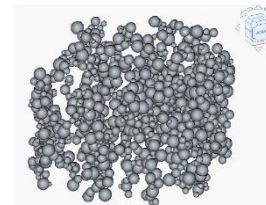
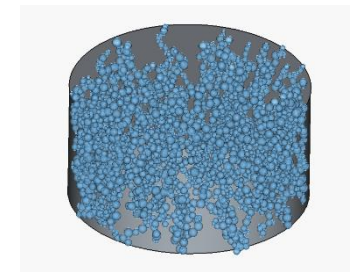
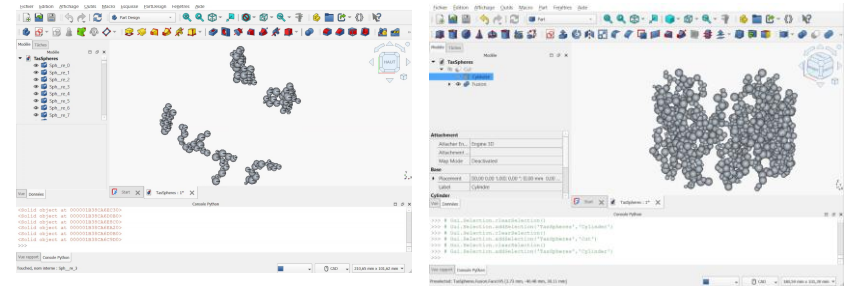
1. Tirage d'un rayon aléatoire
2. Connexion contrôlée
3. Placement spatial
4. Vérification du placement

Export des coordonnées
(x, y, z, r) des sphères

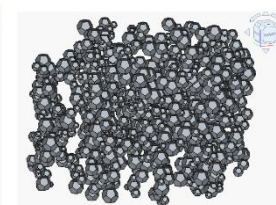


 **FreeCAD**

Forme des pores



(a) Pores sphériques

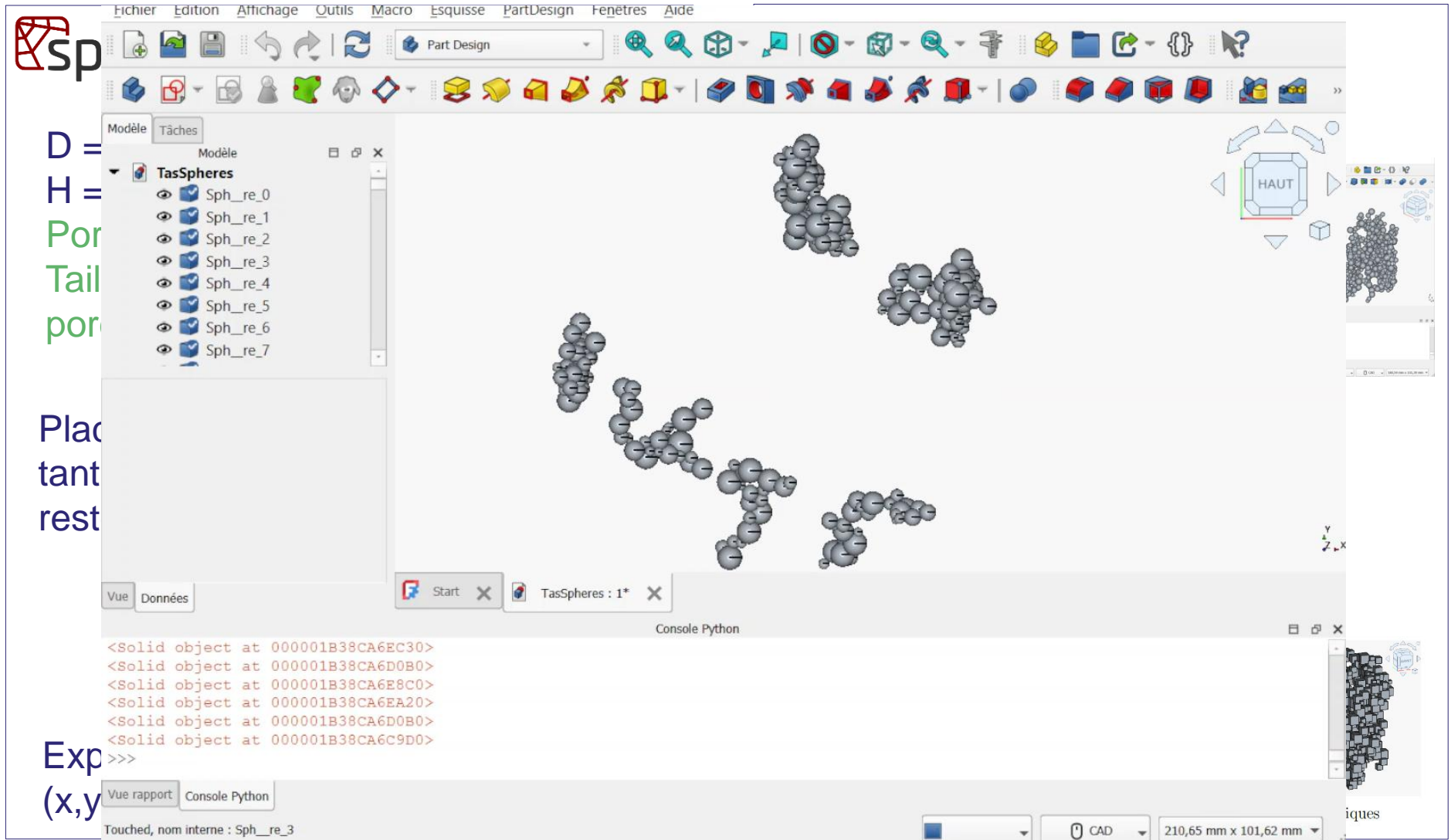


(b) Pores dodécaédriques



(c) Pores cubiques

SOLUTION RETENUE



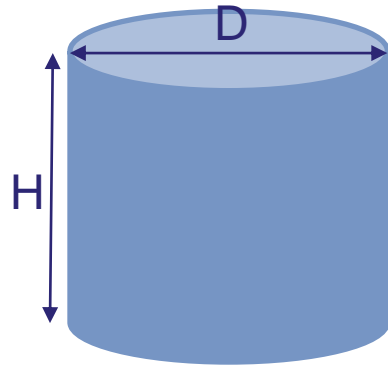
SOLUTION RETENUE

 **spyder**

$D = 100$

$H = 50$

Porosité
Taille des pores



Placement des sphères suivantes tant que la coordonnée verticale reste positive ($z \geq 0$) :

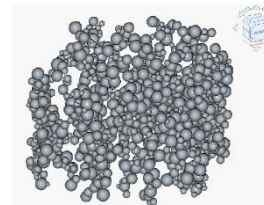
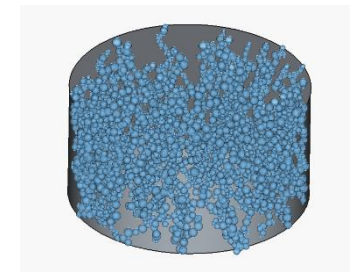
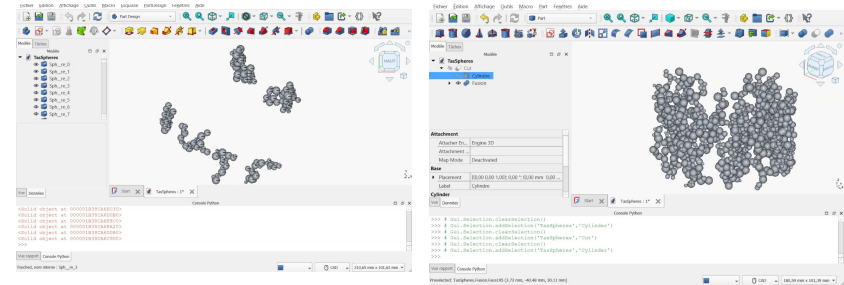
1. Tirage d'un rayon aléatoire
2. Connexion contrôlée
3. Placement spatial
4. Vérification du placement

Export des coordonnées
(x, y, z, r) des sphères

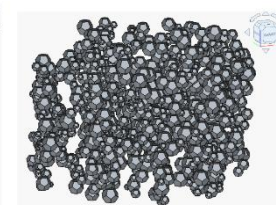


 **FreeCAD**

Forme des pores



(a) Pores sphériques



(b) Pores dodécaédriques



(c) Pores cubiques

SOLUTION RETENUE

The screenshot shows the SolidWorks CAD environment. The main window displays a 3D model of a porous structure composed of numerous small spheres and cylinders. The left-hand side features a 'Tâches' (Tasks) pane with a tree view showing the model hierarchy: 'Modèle' > 'Tâches' > 'TasSpheres' > 'Cut' > 'Cylindre' > 'Fusion'. Below this, the 'Attachment' and 'Base' properties are visible, including placement coordinates and labels. At the bottom, the 'Console Python' window shows the following code:

```
>>> # Gui.Selection.clearSelection()
>>> # Gui.Selection.addSelection('TasSpheres', 'Cylindre')
>>> # Gui.Selection.clearSelection()
>>> # Gui.Selection.addSelection('TasSpheres', 'Cut')
>>> # Gui.Selection.clearSelection()
>>> # Gui.Selection.addSelection('TasSpheres', 'Cylindre')
>>>
```

The status bar at the bottom indicates the preselected object: 'TasSpheres.Fusion.Face195 (3.73 mm, -40.48 mm, 30.11 mm)'. The bottom right corner shows the 'briques' (bricks) palette and the '180,59 mm x 101,39 mm' dimensions.

SOLUTION RETENUE



D = 100

H = 50

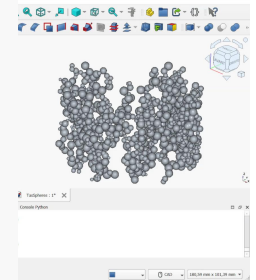
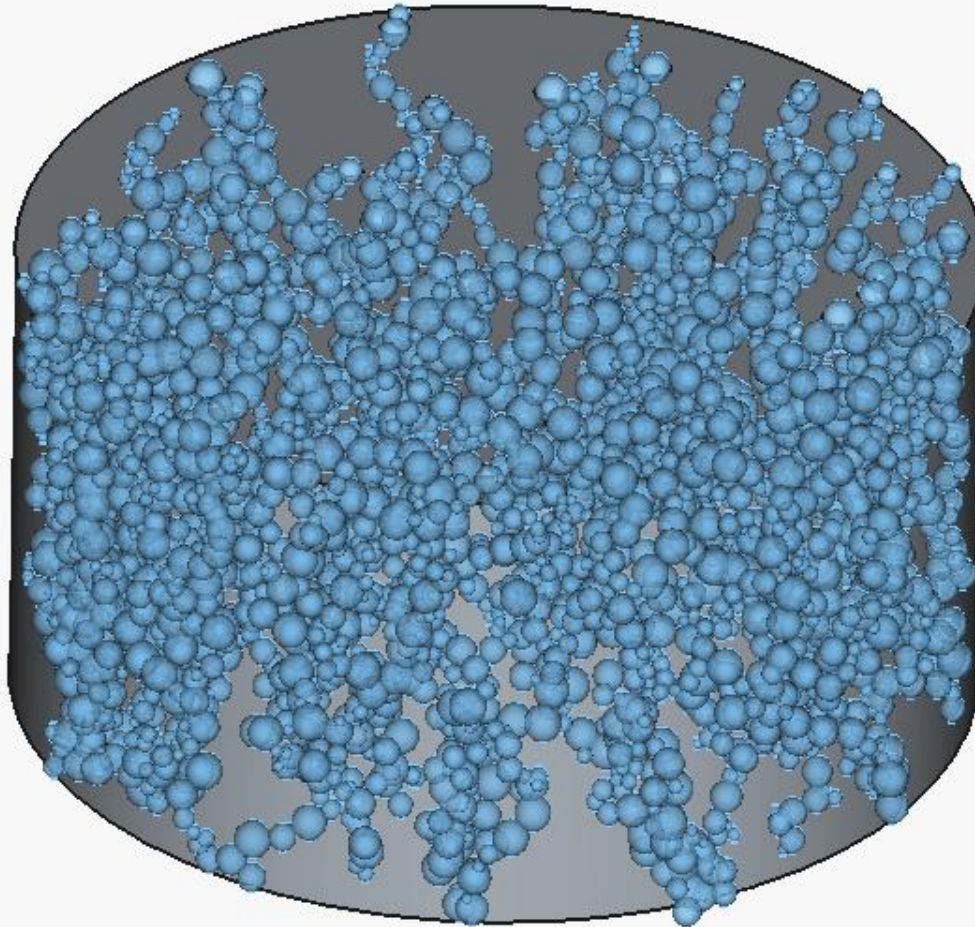
Porosité

Taille des pores

Placemen
tant que l
reste pos

1. Tir
2. Co
3. Pl
4. Vé

Export de
(x,y,z,r) d

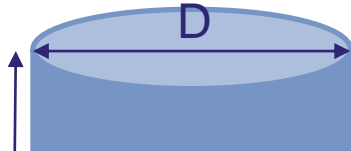


(c) Pores cubiques

SOLUTION RETENUE

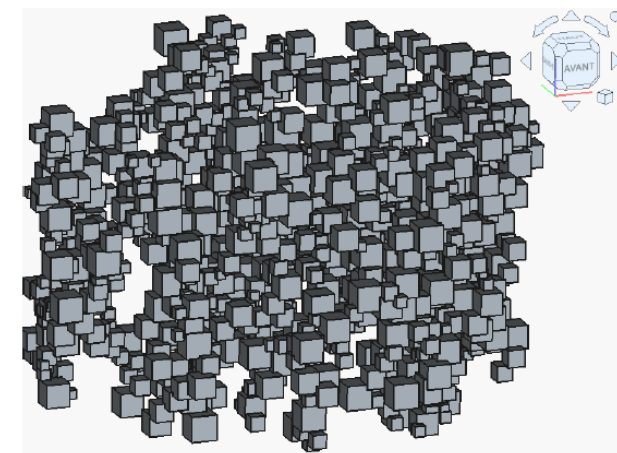
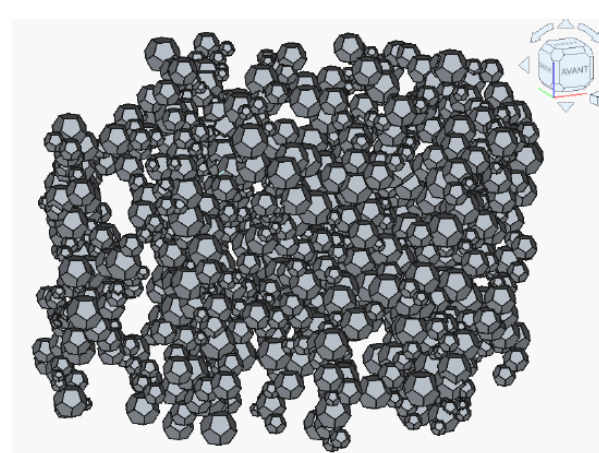
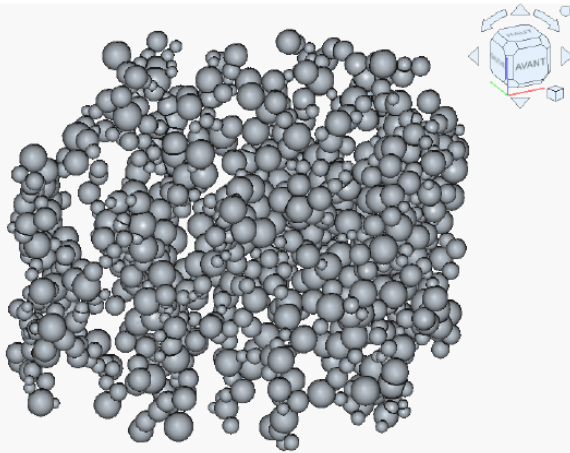
 spyder

$D = 100$
 $H = 50$



 FreeCAD

Forme des pores



(a) Pores sphériques

(b) Pores dodécaédriques

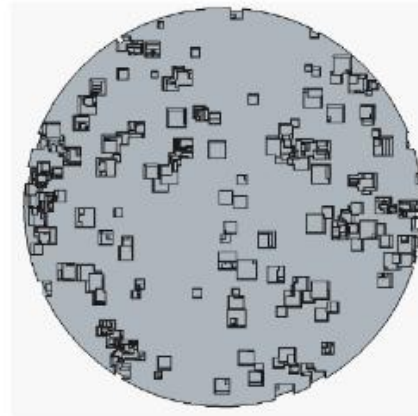
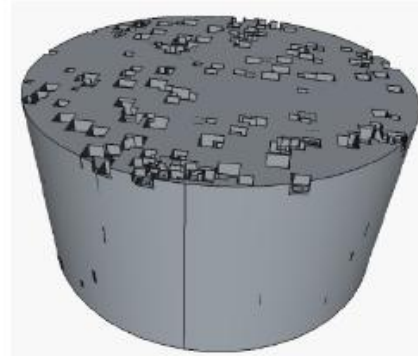
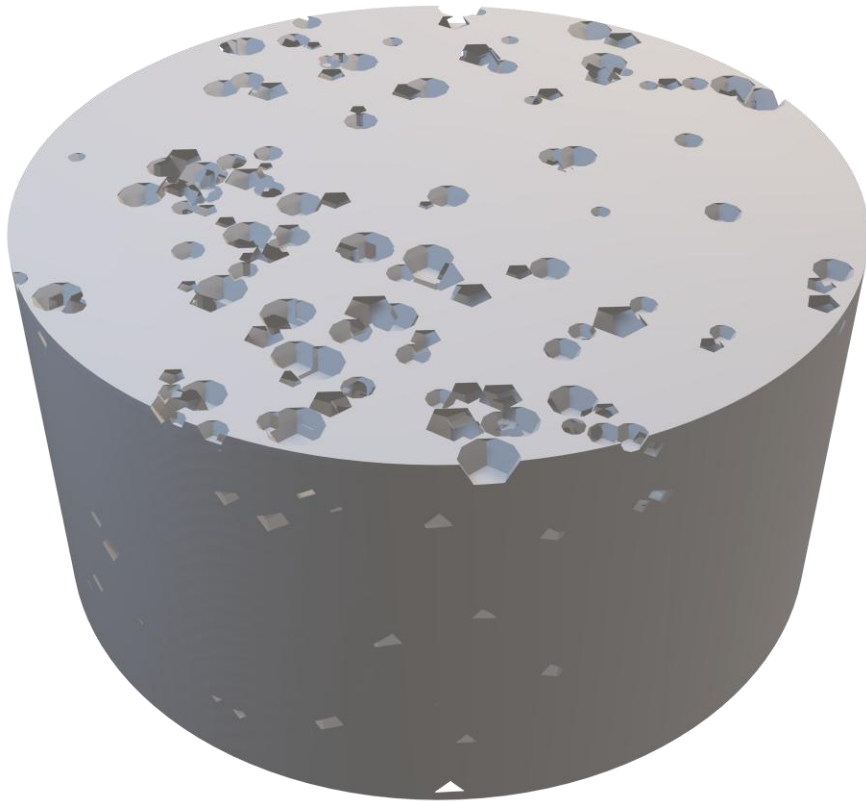
(c) Pores cubiques

3. Placement spatial

4. Vérification du placement

Export des coordonnées
(x,y,z,r) des sphères





→ 16 ÉPROUVETTES IMPRIMÉES



	Porosité déterminée géométriquement	Ecart-type	Porosité déterminée indirectement	Ecart-type
P1 (10%)	5,2 %	1,3 %	7,2 %	0,8 %
P2 (20%)	14,6 %	2,3 %	11,0 %	1,2 %
P3 (30%)	24,6 %	1,1 %	17,2 %	0,4 %
P4 (40%)	37 %	/	26 %	/

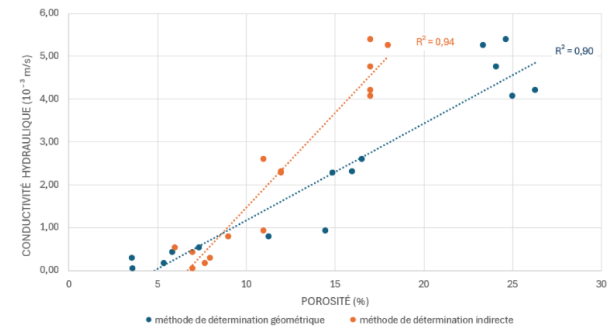


FIGURE 5.2 – Relation entre la porosité et la perméabilité pour les échantillons imprimés en résine.



Porosité déterminée directement	Ecart-type
7,2 %	0,8 %
11,0 %	1,2 %
17,2 %	0,4 %
26 %	/

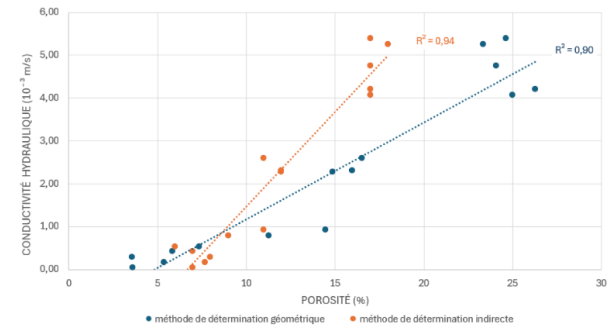
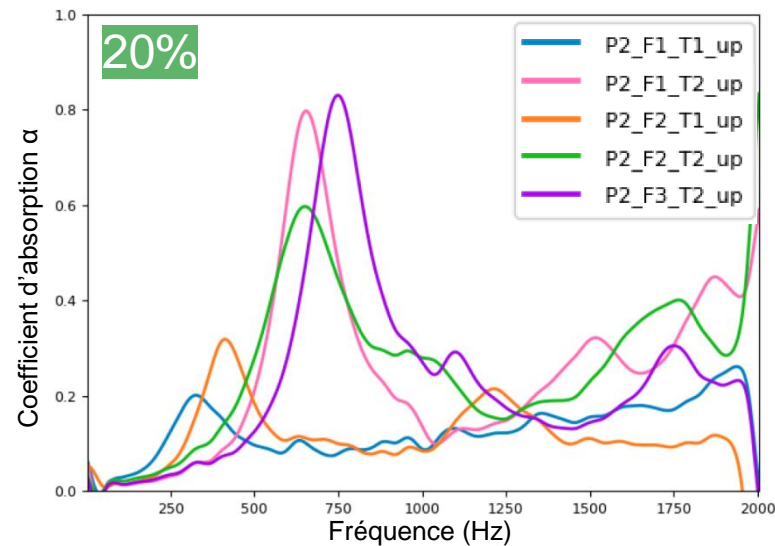
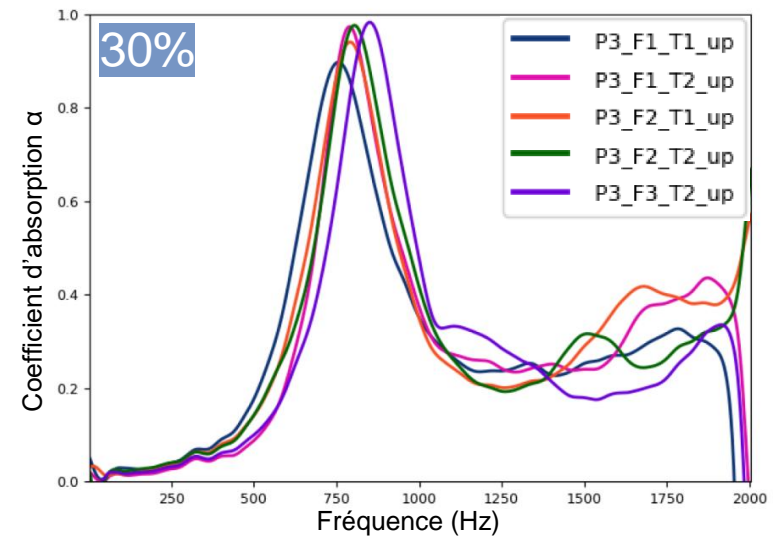
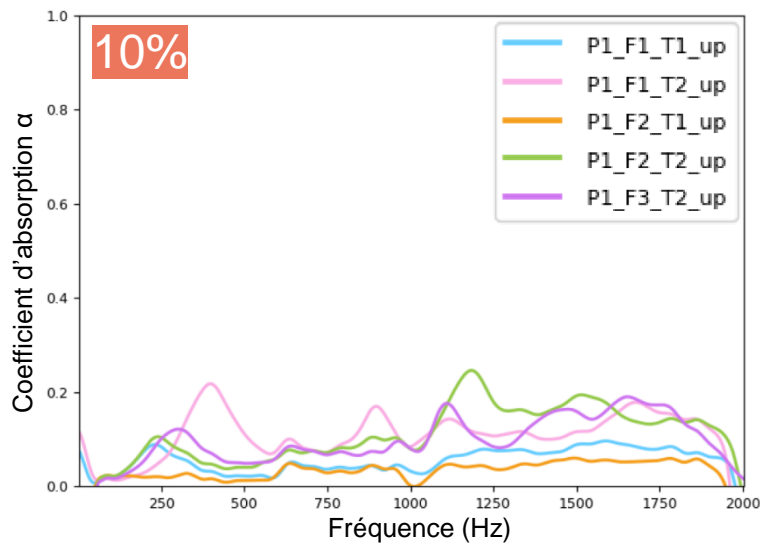


FIGURE 5.2 – Relation entre la porosité et la perméabilité pour les échantillons imprimés en résine.

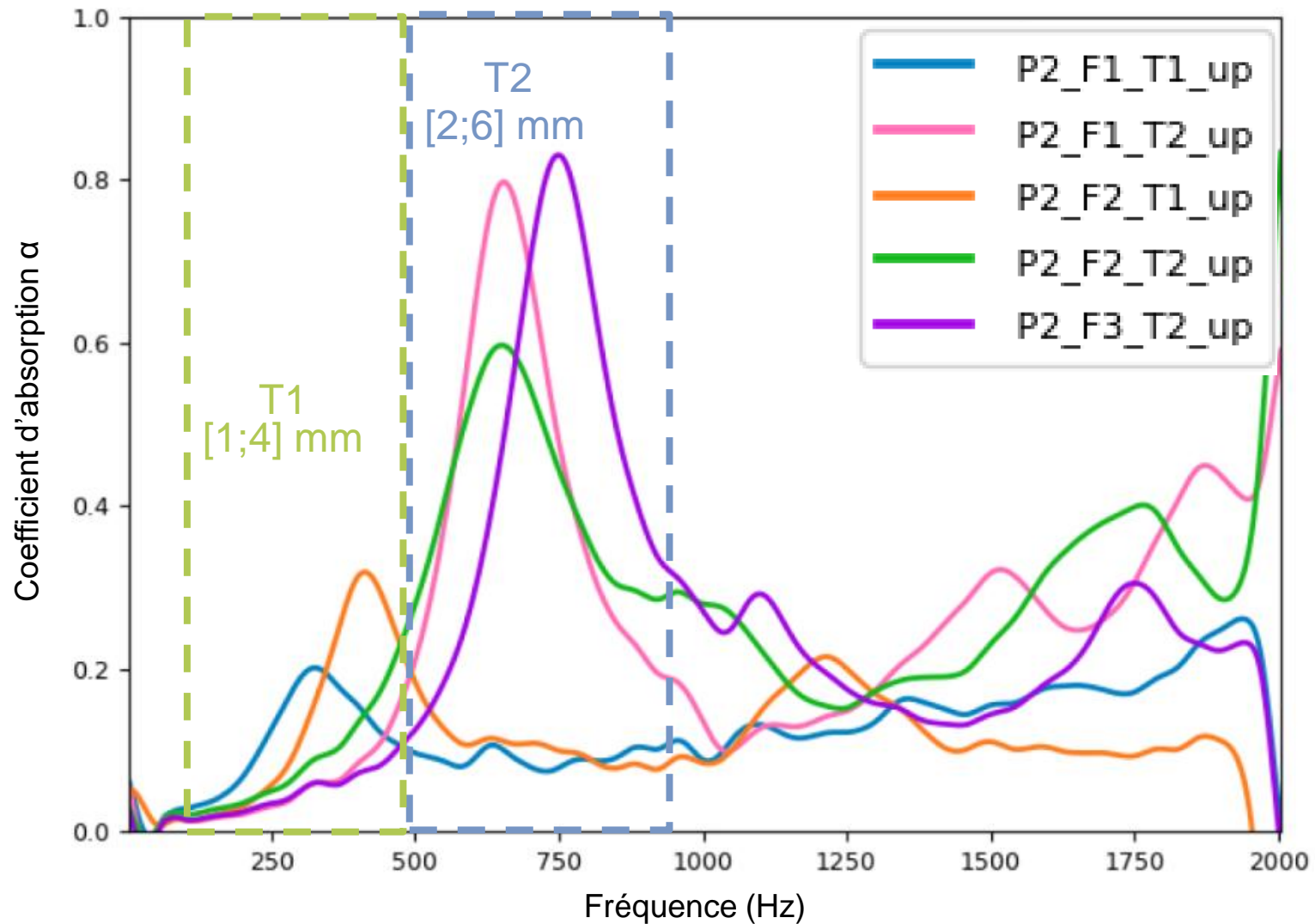
	Porosité déterminée géométriquement	Ecart-type	Porosité déterminée indirectement	Ecart-type
P1 (10%)	5,2 %	1,3 %	7,2 %	0,8 %
P2 (20%)	14,6 %	2,3 %	11,0 %	1,2 %
P3 (30%)	24,6 %	1,1 %	17,2 %	0,4 %
P4 (40%)	37 %	/	26 %	/

CONCLUSIONS :

- LA POROSITÉ ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE SONT CORRÉLÉES



Absorption acoustique à équi-porosité, influence des formes et taille de pores



Absorption acoustique à équi-porosité (20%), influence de la taille de pores

CONCLUSIONS :

- LA POROSITÉ ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE SONT CORRÉLÉES
- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE

(20%), influence de la taille de pores

CONCLUSIONS :

- ~~LA POROSITÉ ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE SONT CORRÉLÉES~~
- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE
- L'AUGMENTATION DE LA POROSITÉ AMÉLIORE CONJOINTEMENT L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE

CONCLUSIONS :

- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE
- L'AUGMENTATION DE LA POROSITÉ AMÉLIORE CONJOINTEMENT L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE, MAIS AU-DELÀ D'UN SEUIL, L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DIMINUE ALORS QUE LA PERMÉABILITÉ CONTINUE DE CROÎTRE

m

CONCLUSIONS :

- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE
- L'AUGMENTATION DE LA POROSITÉ AMÉLIORE CONJOINTEMENT L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE, MAIS AU-DELÀ D'UN SEUIL, L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DIMINUE ALORS QUE LA PERMÉABILITÉ CONTINUE DE CROÎTRE
- LA FORME DES PORES INFLUENCE LA PERMÉABILITÉ À L'EAU ET À L'AIR.

Per

im)

CONCLUSIONS :

- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE
- L'AUGMENTATION DE LA POROSITÉ AMÉLIORE CONJOINTEMENT L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE, MAIS AU-DELÀ D'UN SEUIL, L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DIMINUE ALORS QUE LA PERMÉABILITÉ CONTINUE DE CROÎTRE
- LA FORME DES PORES INFLUENCE LA PERMÉABILITÉ À L'EAU ET À L'AIR.
- LA TORTUOSITÉ N'EXPLIQUE À PRIORI PAS CES INFLUENCES

TORTUOSITÉ (-)

-10

CONCLUSIONS :

- DES PORES PLUS LARGES AMÉLIORENT À LA FOIS PERMÉABILITÉ ET ABSORPTION ACOUSTIQUE

➔ [1;4] mm T1 [2;6] mm T2

- L'AUGMENTATION DE LA POROSITÉ AMÉLIORE CONJOINTEMENT L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ET LA PERMÉABILITÉ HYDRAULIQUE, MAIS AU-DELÀ D'UN SEUIL, L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DIMINUE ALORS QUE LA PERMÉABILITÉ CONTINUE DE CROÎTRE

➔ 10% P1 20% P2 30% P3 40% P4

- LA FORME DES PORES INFLUENCE LA PERMÉABILITÉ À L'EAU ET À L'AIR.

➔ sphérique F1 cubique F2 dodécaédrique F3

- LA TORTUOSITÉ N'EXPLIQUE A PRIORI PAS CES INFLUENCES

CONCLUSION

- Mise en évidence de liens clairs entre **porosité, perméabilité et absorption acoustique** grâce aux prototypes 3D
- Choix d'optimisation
- Recherche \longleftrightarrow opérationnel

PERSPECTIVES

- Explorer des **géométries plus complexes** : gradients de porosité, texture.
- Intégrer la **tenue mécanique** pour concilier performances et robustesse.
- Vers l'**ingénierie routière** : prototypage rapide de revêtements, appui à la conception rationnelle.
- Utiliser cette approche pour d'autres usages



MERCI DE VOTRE ATTENTION

ALEXIA PELTIER

Année 2024-2025

Spécialité : Génie civil, ouvrages d'art

Double diplôme : Master acoustique

ANNEXES





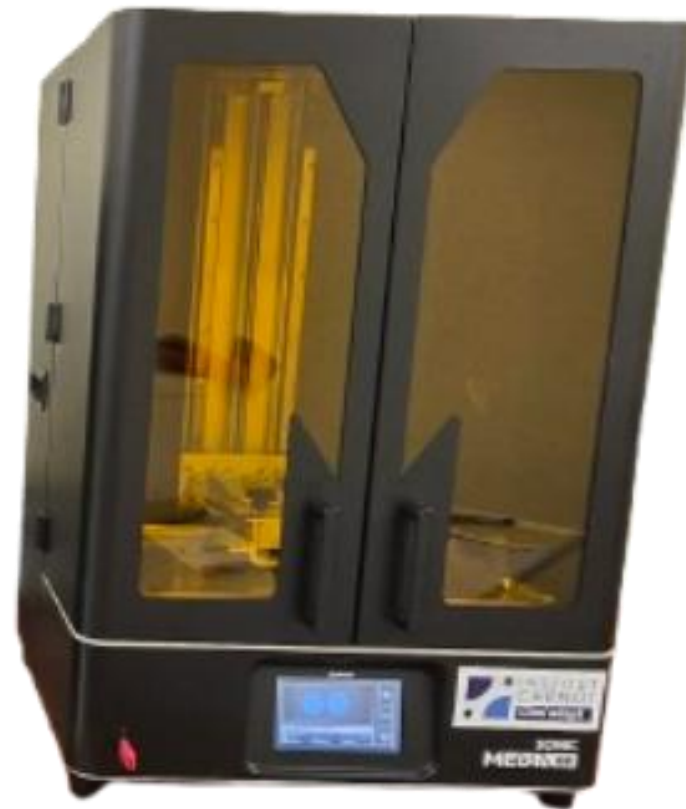
Bac à ultrasons

2



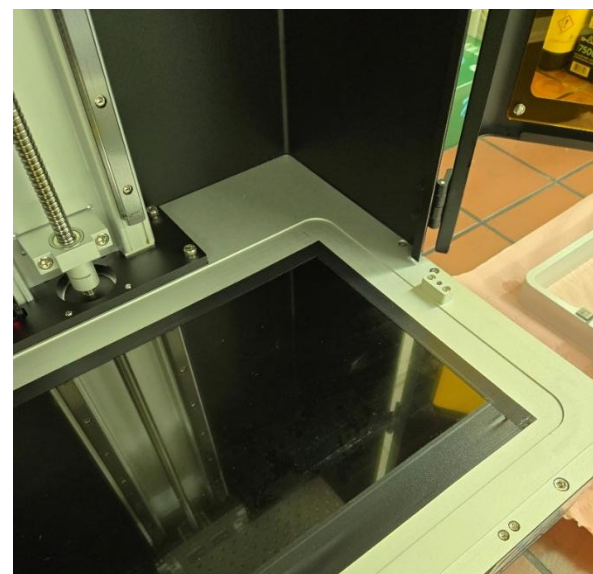
Chambre à Ultra Violet

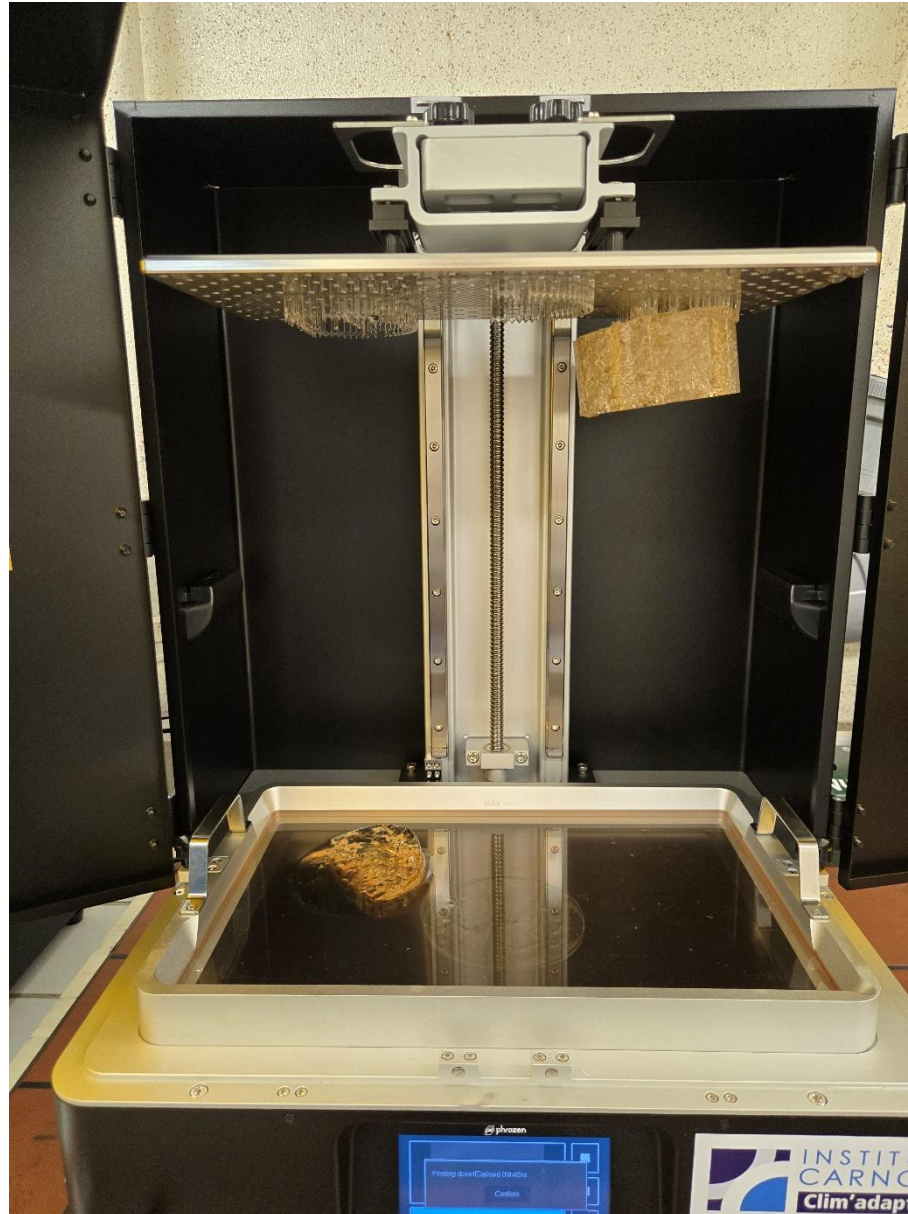
3

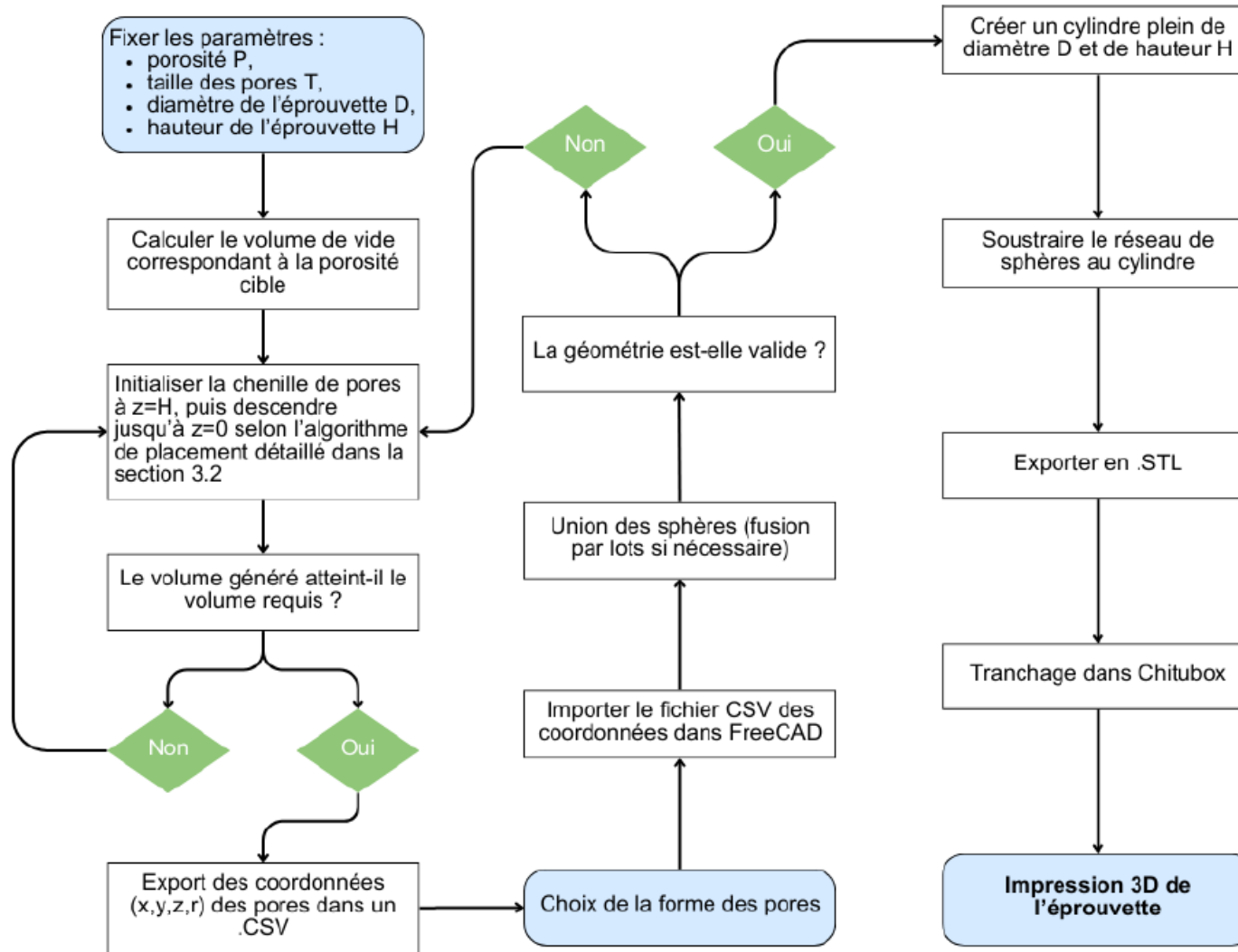


Imprimante 3D

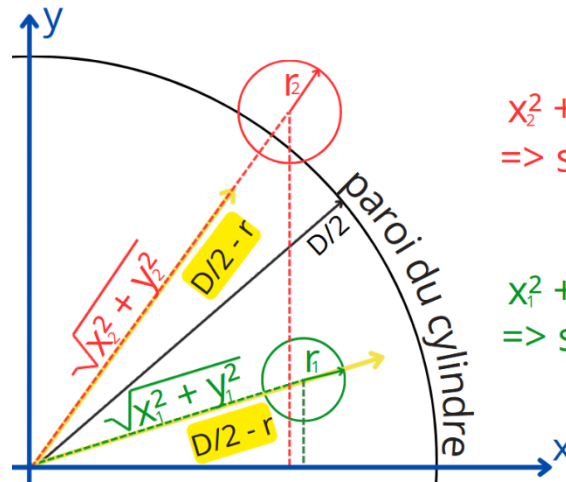
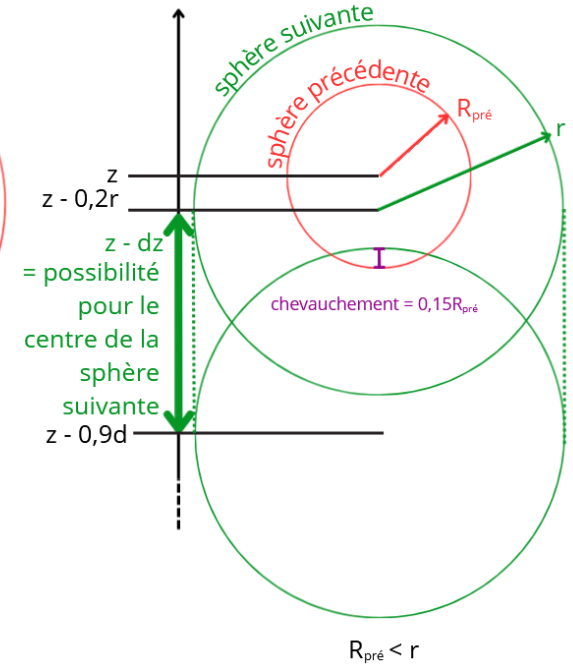
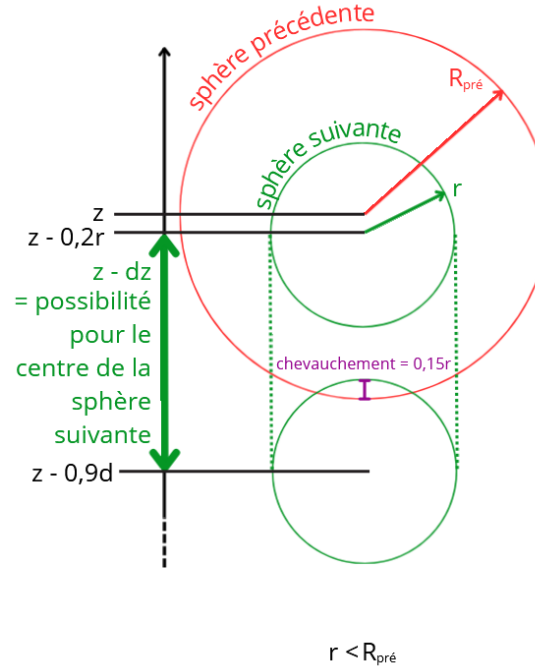
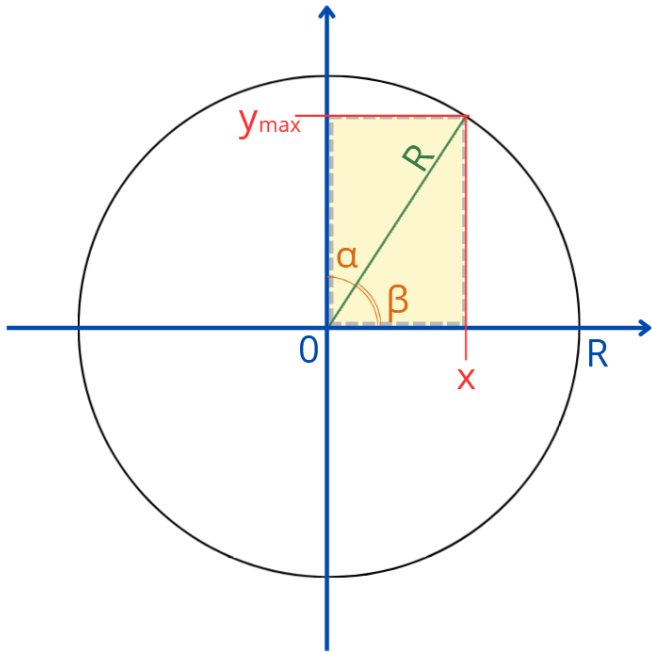
1







ANNEXES



$x_2^2 + y_2^2 > (D/2 - r_2)^2$
 => sphère rejetée

$x_1^2 + y_1^2 < (D/2 - r_1)^2$
 => sphère acceptée