



Capsules De Semences Intelligentes Biodégradables Larguées Par Voie Aérienne Pour Lutter Contre La Désertification

ÉCOLE INTERNATIONALE MAARIF EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CAPSULES INTELLIGENTES DE SEMENCES BIODÉGRADABLES DISTRIBUÉES PAR VOIE AÉRIENNE POUR LUTTER CONTRE LA DÉSERTIFICATION

Nom du projet : SkyXroot Maarif

Domaine : Génie Environnemental / Bio-ingénierie / Conception Mécanique

Mots-clés : Désertification, ensemencement aérien, capsule biodégradable, conception aérodynamique, modélisation paramétrique, système de distribution de semences, avion-cargo et drones

1. RÉSUMÉ DU PROJET

La désertification est un problème environnemental critique qui entraîne la perte de 12 millions d'hectares de terres fertiles chaque année à l'échelle mondiale et affecte directement 3,2 milliards de personnes. Les méthodes traditionnelles de reboisement sont insuffisantes pour lutter contre ce problème en raison des coûts élevés de main-d'œuvre, des terrains inaccessibles et des faibles taux de survie.

Ce projet vise à concevoir et développer une capsule de semences intelligente et biodégradable (SkyXroot) pouvant être larguée par dizaines de milliers depuis de grands avions-cargos pour distribuer des semences à l'échelle mondiale dans des zones vastes et difficiles d'accès.

La capsule possède un profil aérodynamique en forme de torpille et maintient le contrôle d'orientation pendant la descente grâce à 4+4 ailettes de stabilisation (4 principales + 4 de friction). Sa géométrie de nez pointu pénètre dans le sol désertique durci, et au moment de l'impact, son mécanisme interne est déclenché, rompant le sachet d'hydrogel pour fournir de l'humidité à la graine. Le matériau du corps est biodégradable, se dissolvant dans les 48 à

72 heures suivant la première forte pluie, se mélangeant au sol et créant l'espace nécessaire à la germination.

La conception a été développée à l'aide d'une infrastructure de modélisation paramétrique basée sur Python, prototypée avec la technologie d'impression 3D FDM et validée par une production à trois échelles différentes (0,5x, 1x, 2,5x). Dans le cadre du projet, les performances aérodynamiques de la capsule, sa capacité de pénétration dans le sol, son mécanisme de libération de gel déclenché par l'impact, son système de bouchon snap-fit et la cinétique de dissolution du matériau ont été conçus et testés.

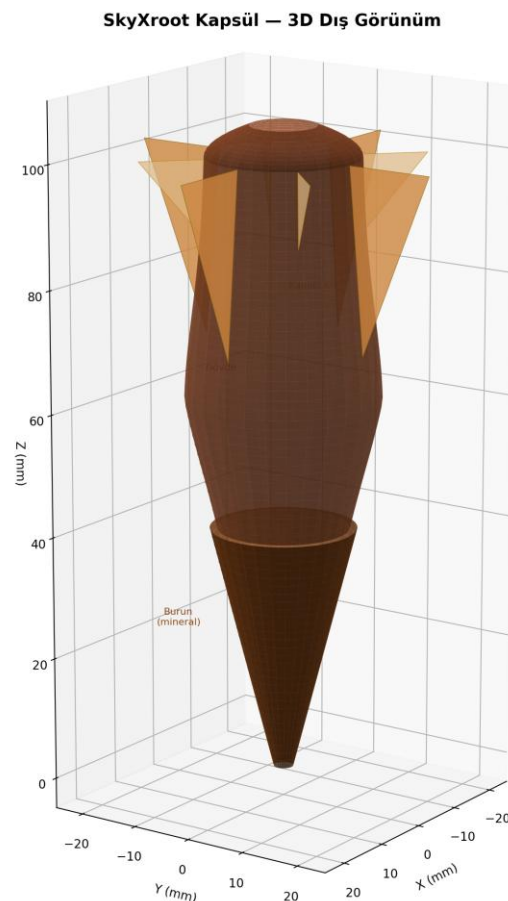


Figure 1 : Vue extérieure 3D de la capsule intelligente SkyXroot — corps profilé torpille, ailettes 4+4 et géométrie de nez conique.

2. OBJECTIFS DU PROJET

2.1 Objectif Principal

Concevoir, prototyper et valider les performances d'une capsule de semences intelligente adaptée à la distribution aérienne dans la lutte contre la désertification, capable de pénétrer le sol, d'humidifier la graine grâce à un mécanisme interne activé par l'impact, et de se biodégrader progressivement pour permettre la germination.

2.2 Sous-objectifs

- 1. Conception Aérodynamique :** Développer une géométrie de capsule profilée torpille assurant une orientation stable pendant la descente et maintenant la position nez vers le bas à la vitesse terminale.
- 2. Optimisation de la Pénétration :** Déterminer l'angle du nez, la distribution des masses et le rapport diamètre/longueur fournissant une profondeur de pénétration adéquate dans différents niveaux de dureté du sol.
- 3. Mécanisme Déclenché par l'Impact :** Concevoir un mécanisme interne passif (sans énergie) utilisant l'énergie cinétique au moment de l'impact pour rompre le sachet d'hydrogel et fournir de l'humidité à la graine.
- 4. Compatibilité des Matériaux Biodégradables :** Optimiser l'équilibre entre la résistance aux chocs, le temps de dissolution et la compatibilité environnementale du corps de la capsule.
- 5. Fabricabilité :** Valider la conception par prototypage rapide avec impression FDM 3D avant la production en série ; prouver la fabricabilité à différentes échelles (0,5x, 1x, 2,5x).
- 6. Structure Modulaire :** Établir une infrastructure de conception paramétrique adaptable à différents types de sol, tailles de graines et conditions climatiques.

2.3 Hypothèse

« Une capsule de semences biodégradable avec un profil torpille, une stabilisation par ailettes et un mécanisme interne déclenché par l'impact peut : (i) maintenir l'orientation nez vers le bas grâce aux ailettes aérodynamiques pour atteindre la zone cible lors d'un largage aérien, (ii) pénétrer le sol désertique durci grâce à sa géométrie de nez pointu et sa distribution de poids optimale, (iii) activer son mécanisme passif à l'impact pour humidifier la graine, et (iv) se biodégrader pour permettre la germination. »

3. INTRODUCTION ET DÉFINITION DU PROBLÈME

3.1 Le Problème de la Désertification et son Ampleur

La désertification, selon la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD), est le processus par lequel le sol perd sa productivité dans les régions arides, semi-arides et subhumides en raison de divers facteurs, principalement le changement climatique et les activités humaines.

Ampleur mondiale :

- Environ 40 % de la surface terrestre est constituée de zones arides.
- On estime que 12 millions d'hectares de terres fertiles sont perdus chaque année — soit environ 23 hectares par minute.
- 3,2 milliards de personnes sont directement affectées par la désertification.
- Les pertes économiques dues à la désertification sont estimées à 42 milliards USD par an.

- On prévoit que les migrants climatiques dépasseront les 200 millions d'ici 2050, la désertification étant l'une des causes principales.

Le problème n'est pas limité à un pays ou une région spécifique ; la perte de terres se produit sur tous les continents, de l'Afrique à l'Asie centrale, de l'Australie à l'Amérique du Sud. C'est pourquoi SkyXroot est conçu comme une solution mondiale ciblant la planète entière plutôt qu'une géographie locale quelconque.

3.2 Insuffisance des Méthodes de Reboisement Existantes

Les méthodes traditionnelles de reboisement font face aux contraintes suivantes :

Méthode	Avantage	Inconvénient
Plantation manuelle	Taux de survie élevé (60-80 %)	Très lente (1-2 ha/jour/personne), coût de main-d'œuvre élevé
Plantation mécanique	Vitesse moyenne	Nécessite un terrain plat, inadaptée aux zones pentues/rocheuses
Semis à la volée	Grande surface, faible coût	Taux de survie très faible (1-5 %), pertes par oiseaux et vent
Plantation de semis	Taux de survie le plus élevé	Coût le plus élevé, difficultés logistiques, besoin en eau

Problèmes communs :

- **Accès** : Le reboisement est impossible dans les zones inaccessibles telles que les zones montagneuses, rocheuses, de guerre ou minées.
- **Vitesse** : Impossible de suivre le rythme du changement climatique — la surface perdue dépasse largement la surface reboisée.
- **Coût** : La plantation manuelle traditionnelle coûte entre 1 000 et 5 000 USD par hectare.
- **Échelle** : Le reboisement de millions d'hectares par des méthodes manuelles prendrait des générations.

3.3 Pourquoi l'Ensemencement Aérien ?

L'ensemencement aérien résout la plupart des contraintes ci-dessus :

- **Vitesse** : Des dizaines de milliers de capsules de semences peuvent être distribuées en une seule sortie avec un avion-cargo.
- **Accès** : Accès facile aux zones dangereuses, éloignées ou inaccessibles à l'homme.
- **Coût** : Le coût par hectare peut être réduit à 10-15 % de la plantation traditionnelle.
- **Échelle** : Des milliers d'hectares peuvent être couverts quotidiennement avec des avions-cargos.
- **Automatisation** : Positionnement GPS précis, planification de routes de vol et intégration cartographique.

Cependant, les méthodes actuelles d'ensemencement aérien ont un problème critique : **le semis de graines nues entraîne des taux de survie très faibles de 1 à 5 %**. Les graines sont

vulnérables à la consommation par les oiseaux/rongeurs, à la dispersion par le vent, à l'entraînement par les eaux de ruissellement et au manque d'humidité.

La solution SkyXroot : Protéger la graine avec une capsule biodégradable, l'enfoncer dans le sol grâce à un mécanisme de pénétration, et fournir l'humidification initiale critique avec un système d'hydrogel déclenché par l'impact.

3.4 Valeur Unique du Projet

Innovations clés distinguant SkyXroot des solutions existantes :

- 1. Mécanisme Passif Déclenché par l'Impact :** Un système de libération de gel entièrement mécanique ne nécessitant ni électronique ni source d'énergie. La surface intérieure crantée rompt le sachet de gel par inertie lors de l'impact, fournissant de l'humidité à la graine.
- 2. Fonctions Intégrées :** Combinaison des fonctions protection + pénétration + humidification + nutriments (nez minéral) + biodégradation dans une seule capsule.
- 3. Conception Paramétrique :** Conception rapidement adaptable à différentes tailles de graines, types de sol et conditions climatiques grâce à une infrastructure entièrement paramétrique basée sur Python.
- 4. Jonction d'Ailettes Segmentée :** Conception d'ailettes segmentées s'adaptant parfaitement au profil torpille (ailettes inférieures : 15 segments, ailettes supérieures : 8 segments) — intégrité structurelle avec pénétration de 2 mm à chaque point de courbure du corps.
- 5. Production en Série & Intégration en Cassettes :** Les capsules sont produites en série, pré-remplies de graines, d'hydrogel et de minéraux en usine. Elles sont intégrées dans de grandes cassettes et chargées dans des avions-cargos — aucun remplissage sur le terrain n'est nécessaire. Le bouchon snap-fit assure une fermeture automatique.

4. REVUE DE LA LITTÉRATURE

4.1 Statistiques de Désertification et Impacts Mondiaux

Selon les données du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), la désertification est un processus affectant plus de 100 pays dans le monde et s'accéléralant chaque année. Le Rapport Spécial du GIEC sur l'Utilisation des Terres (2019) a révélé que le changement climatique accélère la désertification, les températures croissantes et les régimes de précipitations changeants réduisant l'humidité du sol.

Sur le continent africain, la limite sud du désert du Sahara avance d'environ 48 km vers le sud chaque année. Dans la région du Sahel, les précipitations ont diminué de 25 à 40 % au cours des 50 dernières années. En Chine, le désert de Gobi s'étend d'environ 3 600 km² par an et s'est approché à 70 km de Pékin.

4.2 Technologies d'Ensemencement Aérien

Le concept d'ensemencement aérien n'est pas nouveau. Dans les années 1930, le Civilian Conservation Corps aux États-Unis a mené des essais de semis depuis des avions. Après la Seconde Guerre mondiale, des avions militaires ont également été utilisés pour des expériences d'ensemencement aérien sur de vastes zones. SkyXroot vise à porter cette tradition à l'échelle mondiale avec de grands avions-cargos.

Approches principales :

- **Bombe de Semences (Seed Ball)** : Boules de mélange argile + compost + graines développées par Masanobu Fukuoka en 1938. Simple et peu coûteuse, mais sans capacité de pénétration ; reste en surface, exposée aux oiseaux.
- **Pod de Semences** : Mélange graines + nutriments placé dans une capsule biodégradable. Offre une protection mais un mécanisme d'enfouissement inadéquat.
- **Type Dart/Fléchette** : Conceptions pointues capables de pénétrer le sol. Avantage de pénétration, mais généralement sans mécanismes internes (humidification, libération de nutriments).
- **Approche SkyXroot** : Pénétration dart + protection capsule + humidification déclenchée par l'impact + nutriments minéraux + biodégradation — combine toutes les fonctions dans une structure unique.

4.3 Solutions Commerciales Existantes

Entreprise	Méthode	Capacité de Distribution	Portée	Pays
Bombe de Semences	Lancer manuel	~1 000/jour	Sur place	Traditionnel
Flash Forest	Drone (70 kg) + pod bio	~100 000/jour	~30 km	Canada
AirSeed Technologies	Essaim de drones + capsule	~250 000/jour	~30 km	Australie
Land Life Company	Cocoon (protégé par eau)	Plantation manuelle	Sur place	Pays-Bas
SkyXroot	Avion-cargo + capsule intelligente	50 000+/sortie	5 000+ km	Mondial

Lacunes communes des solutions existantes :

- La plupart manquent de mécanismes de pénétration du sol.
- Aucune ne dispose d'un système d'humidification passive s'activant à l'impact.
- Aucune solution n'offre une infrastructure de conception entièrement paramétrique et open source.
- Les solutions existantes sont basées sur les drones avec une capacité de transport limitée ; la distribution de dizaines de milliers de capsules à l'échelle mondiale avec de grands avions-cargos n'est prévue dans aucune d'entre elles.

4.4 Matériaux Biodégradables

Principaux groupes de polymères biodégradables évalués pour les applications de capsules de semences :

Matériau	Temps de Dégradation	Résistance Mécanique	Coût	Adéquation
PLA (Acide Polylactique)	6-24 mois	Élevée, fragile	Faible	Bon pour prototypes, dissolution lente
PHA (Polyhydroxyalkanoate)	1-6 mois	Moyenne-élevée, ductile	Élevé	Dégradation idéale, coûteux
À base d'amidon	1-4 semaines	Faible-moyenne	Très faible	Dissolution rapide, mécaniquement faible
Mélange amidon-PLA	2-8 semaines	Moyenne	Faible	Bon équilibre
Acétate de cellulose	1-2 mois	Moyenne	Moyen	Bon candidat

Le temps de dissolution cible de la capsule SkyXroot étant de **48-72 heures** (après la première forte pluie), le PLA pur est trop lent. Les mélanges amidon-PLA ou les composites à base d'amidon sont les candidats les plus appropriés.

4.5 Géométries Aérodynamiques de Capsules/Darts

Les conceptions de projectiles assurant une descente stable dans l'air ont une longue histoire d'ingénierie :

- **Dart à Ailettes (Fléchette)** : Les ailettes arrière déplacent le centre de pression aérodynamique (CP) derrière le centre de gravité (CG) → stabilité statique. Le rapport longueur/diamètre est typiquement de 3:1 – 5:1.
- **Profil Torpille** : Forme profilée réduisant le coefficient de traînée aérodynamique (Cd). Faible traînée de pression au nez, écoulement laminaire sur le corps.
- **Profil à Renflement Gaussien** : Renflement contrôlé dans la zone du centre de gravité — augmente le volume interne, optimise la position du CG.

SkyXroot utilise une combinaison **profil torpille + renflement gaussien + 4+4 ailettes**. Cela fournit un équilibre idéal entre stabilité aérodynamique et optimisation du volume interne.

SkyXroot — Aerodinamik Profil ve Stabilite Analizi

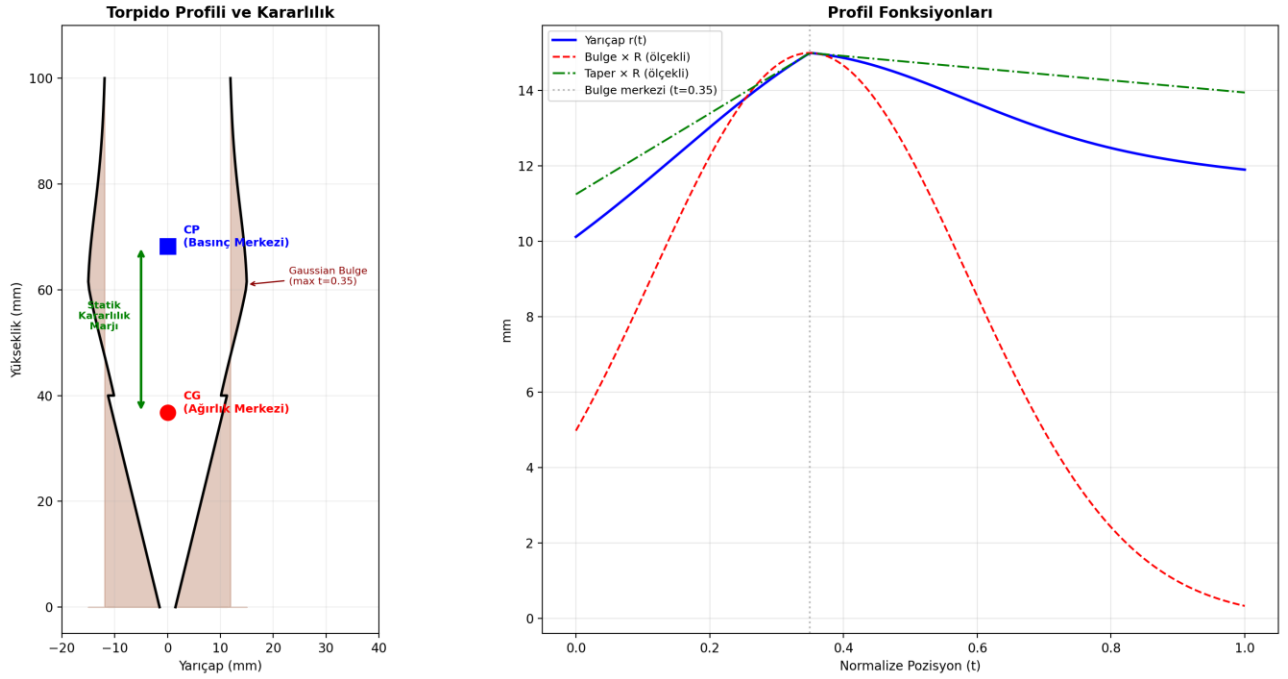


Figure 2 : Démonstration du profil torpille de la capsule SkyXroot, de la fonction de renflement gaussien et des positions CG/CP. Le CG restant devant le CP assure la stabilité statique.

4.6 Lacune dans la Littérature

L'examen de la littérature existante et des solutions commerciales a identifié les lacunes suivantes :

- 1. Absence de mécanisme déclenché par l'impact :** Aucune solution existante ne dispose d'un mécanisme passif d'humidification/libération de nutriments déclenché par l'énergie cinétique de l'impact au sol.
- 2. Intégration pénétration-protection :** Les conceptions de type dart manquent de fonctions internes ; les conceptions de type pod manquent de capacité de pénétration. Aucune conception ne combine les deux.
- 3. Conception paramétrique ouverte :** Aucune des solutions commerciales n'offre une infrastructure de conception open source et adaptable paramétriquement.
- 4. Concept de nez minéral :** Le concept de pointe de pénétration se dissolvant simultanément pour fournir des nutriments (fer, phosphore) au sol n'apparaît pas dans la littérature.

Ce projet vise à combler ces quatre lacunes simultanément.

5. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

5.1 Méthode de Conception

5.1.1 Modélisation 3D Paramétrique

La géométrie de la capsule a été modélisée de manière entièrement paramétrique en utilisant le langage de programmation Python. Bibliothèques utilisées :

- **NumPy** : Calculs mathématiques, fonctions trigonométriques, génération d'anneaux et de surfaces.
- **numpy-stl** : Création, fusion et sauvegarde de maillages STL.

Avantages de l'approche paramétrique :

- Génération de nouvelles géométries en modifiant n'importe quel paramètre dimensionnel.
- Conception reproductible et versionnable.
- Génération automatique de maillages — aucun logiciel de CAO nécessaire.
- Production à différentes tailles via des facteurs d'échelle.

5.1.2 Géométrie du Profil Torpille

Le corps de la capsule est une surface de révolution dérivée d'un profil torpille. Fonction de profil :

$\text{body_radius_at}(t) = \text{rayon_externe} \times \text{rétrécissement}(t) \times (0,85 + 0,15 \times \text{renflement}(t))$

Où :

- **t** : Position normalisée le long du corps (0 = côté nez, 1 = queue)
- **renflement(t)** : Fonction de renflement gaussien : $\exp(-((t - 0,35) \times 3,0)^2)$
- **rétrécissement(t)** : Fonction de rétrécissement (bas : 0,75, haut : 0,93)

Paramètres dimensionnels clés :

Paramètre	Valeur	Description
Diamètre de la capsule	30,0 mm	Diamètre extérieur maximum
Hauteur du nez	40,0 mm	Zone conique du nez
Hauteur du corps	60,0 mm	Corps cylindrique-torpille
Longueur totale	100,0 mm	Nez + corps
Rayon de pointe du nez	1,5 mm	Pointe effilée (non émoussée)
Épaisseur de paroi	2,5 mm	Épaisseur nominale de coque
Diamètre de cavité	20,0 mm	Diamètre de la cavité interne
Rapport longueur/diamètre	3,33:1	Dans la plage de stabilité aérodynamique

5.1.3 Conception d'Ailettes Segmentées

La capsule possède deux types d'ailettes :

Ailettes de Stabilisation Inférieures (Ailettes Principales) :

- Nombre : 4 (espacées de 90°)
- Hauteur : 30,0 mm
- Largeur : 14,0 mm (s'élargissant de la base à la pointe)
- Épaisseur : 1,5 mm

- Position : 30 mm supérieurs du corps ($z = 70-100$ mm, zone de queue)

Ailettes de Friction Supérieures :

- Nombre : 4 (décalées de 45°)
- Hauteur : 12,0 mm
- Largeur : 10,0 mm
- Épaisseur : 1,5 mm
- Position : 12 mm supérieurs du corps

Solution de Jonction Segmentée :

Dans la conception initiale, les bords internes des ailettes étaient modélisés comme des lignes droites. Cependant, comme le corps a un profil torpille, des espaces de 0,2-0,4 mm se formaient entre l'aillette et le corps aux hauteurs intermédiaires. Cet espace amenait le slicer d'impression 3D à interpréter les ailettes comme des corps séparés.

Solution : Chaque ailette est divisée en segments sur sa hauteur (ailerres inférieures : 15 segments, ailerres supérieures : 8 segments). Le bord interne de chaque segment est enfoncé de 2 mm (FIN_PENETRATION) à partir du rayon réel du corps à cette hauteur, pénétrant physiquement dans le maillage du corps.

5.1.4 Mécanisme de Bouchon Snap-Fit

L'extrémité supérieure de la capsule est laissée ouverte pour le remplissage de graines et de gel ; après remplissage, elle est scellée avec un bouchon snap-fit.

Composants du bouchon :

- **Lèvre** : Partie cylindrique s'emboîtant dans la cavité du corps (profondeur : 5,0 mm)
- **Crête** : Protubérance snap-fit en forme d'anneau sur la lèvre (hauteur : 1,2 mm, profondeur : 0,5 mm)
- **Dôme** : Dôme couvrant le sommet du bouchon (hauteur : 3,0 mm)

Côté corps :

- **Rainure** : Rainure annulaire où s'emboîte la crête (profondeur : 0,35 mm)
- **Jeu de lèvre** : 0,25 mm (tolérance)

5.2 Architecture Interne et Mécanisme d'Impact

5.2.1 Structure Interne en Couches

La cavité interne continue unique de la capsule est fonctionnellement divisée en quatre zones (pas de barrières physiques) :

Bouchon (snap-fit)	$z = 100 \text{ mm}$
ZONE GEL (sachet d'hydrogel)	$z = 62 - 95 \text{ mm}$ 33 mm de hauteur
ZONE CRANTÉE (8 crans \times 3 rangées)	$z = 50 - 62 \text{ mm}$ 12 mm de hauteur
ZONE GRAINES (siège de la graine)	$z = 40 - 50 \text{ mm}$ 10 mm de hauteur
NEZ (plein) (poudre de fer+minéral)	$z = 0 - 40 \text{ mm}$

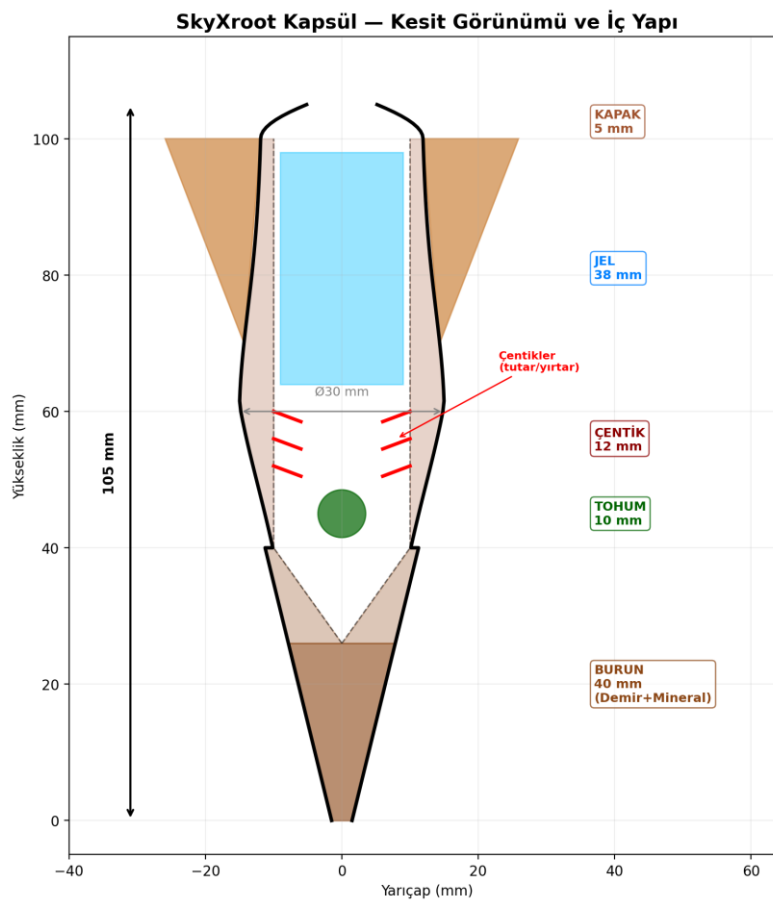


Figure 3 : Vue en coupe de la capsule — nez (fer+minéral), zone graines, zone crantée, sachet d'hydrogel et positions des ailettes.

5.2.2 Mécanisme de Libération de Gel Déclenché par l'Impact

Le mécanisme original développé pour ce projet fonctionne comme suit :

Préparation (remplissage) :

1. La zone du nez de la capsule est déjà pleine (composite minéral).
2. La graine est placée dans la zone graines ($z = 40\text{-}50 \text{ mm}$).
3. Le sachet d'hydrogel est placé au-dessus de la zone crantée ($z = 62\text{+} \text{ mm}$).

4. L'hydrogel est maintenu en place par la prise par friction des crans.
5. Le bouchon est fixé.

Moment de l'impact ($t = 0$) :

1. La capsule pénètre le sol ; le corps subit une décélération brutale.
2. Le sachet d'hydrogel à l'intérieur se déplace vers le bas par inertie.
3. Lorsque le sachet traverse la zone crantée, 3 rangées \times 8 crans pointus déchirent/perforent le sachet.
4. Le gel s'écoule du sachet déchiré vers la zone graines.
5. La graine est humidifiée ; l'humidité initiale nécessaire à la germination est fournie.

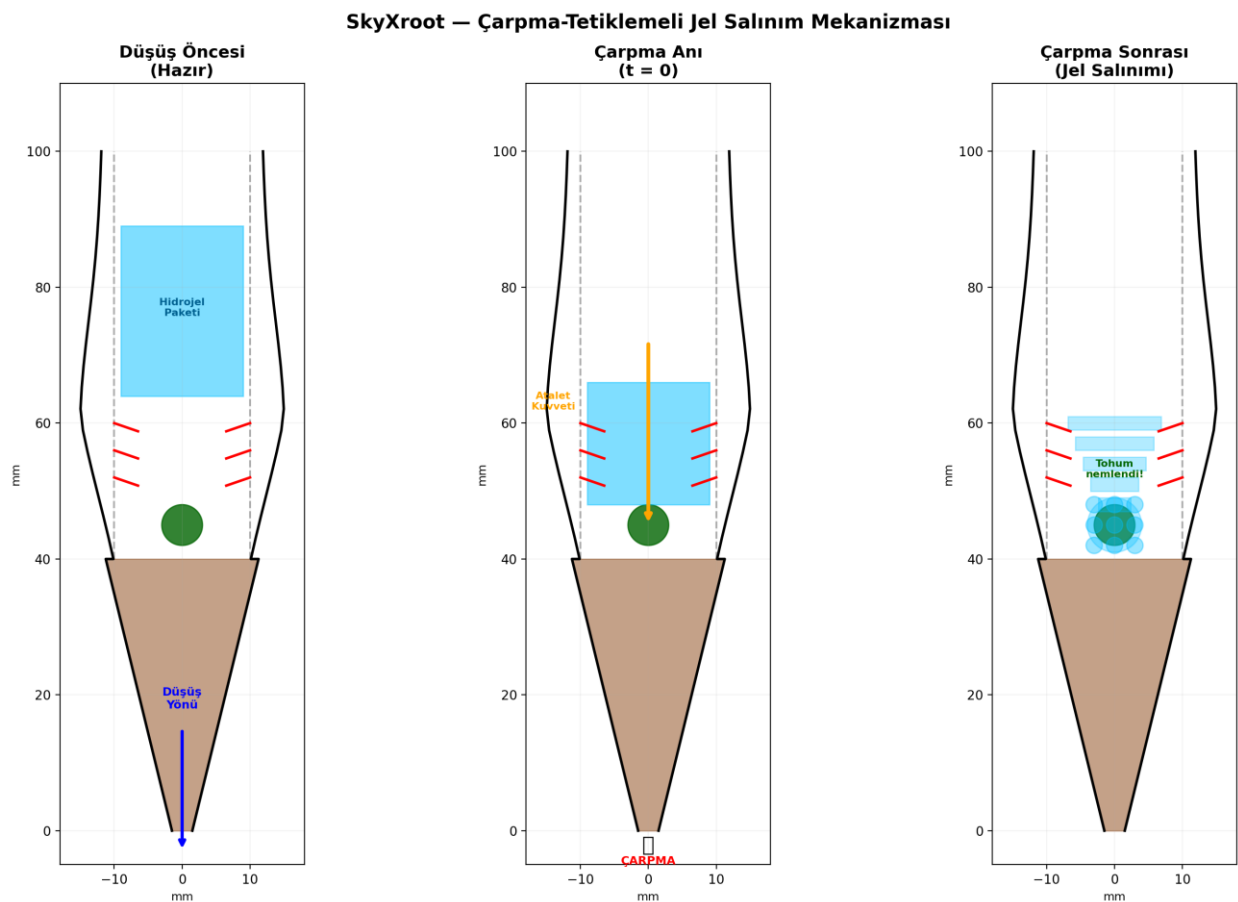


Figure 4 : Trois étapes du mécanisme de libération de gel déclenché par l'impact — pré-descente (prêt), moment de l'impact (force d'inertie) et post-impact (rupture du gel et humidification des graines).

5.3 Sélection des Matériaux

5.3.1 Matériau du Corps

Matériau proposé : Composite polymère biodégradable à base d'amidon

- Mélange amidon-PVA (alcool polyvinylique) — soluble dans l'eau, mécaniquement adéquat

Matériau de prototypage : PLA (par impression 3D)

5.3.2 Composite du Nez

Composition du composite (proposée) :

- 40-50 % Poudre de fer (Fe) — poids + nutrition en fer
- 20-30 % Liant amidon — intégrité structurelle + biodégradation
- 10-15 % Phosphate de calcium — nutrition en phosphore
- 5-10 % Biochar — amendement du sol
- 5-10 % Eau — facilité de moulage

5.4 Prototypage

5.4.1 Production de Prototypes par Impression 3D FDM

Les prototypes ont été produits avec la technologie FDM. Imprimante utilisée : série AnyCubic.

Fichiers prototypes :

- skyxroot_body.stl — Corps (14 864 triangles)
- skyxroot_cap.stl — Bouchon (3 072 triangles)

5.4.2 Paramètres d'Impression

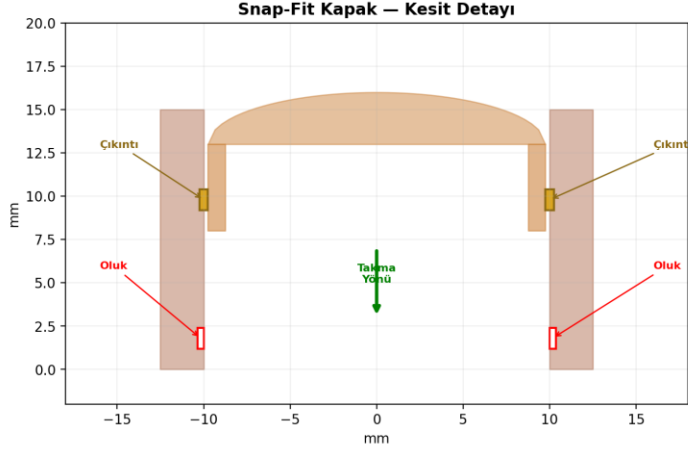
Paramètre	1x (Standard)	2,5x (Grand)	0,5x (Petit)
Hauteur de couche	0,1-0,15 mm	0,2 mm	0,08-0,12 mm
Taux de remplissage	20-30 %	15-20 %	25-35 %
Structure de support	Oui (nez)	Oui (nez+ailettes)	Oui (nez)

5.4.3 Production Multi-Échelle

Version	Échelle	Taille du Corps	Taille du Bouchon	Objectif
E (standard)	1,0x	30 × 100 mm	Ø30 × 8 mm	Prototype fonctionnel
G (grand)	2,5x	75 × 250 mm	Ø75 × 20 mm	Présentation, inspection
H (petit)	0,5x	15 × 50 mm	Ø15 × 4 mm	Simulation production de masse

SkyXroot — Snap-Fit Kapak Mekanizması Detayı

Kapak Tolerans Ölçüleri



Kavite çapı (iç)	Ø20.0 mm
Dudak çapı	Ø19.5 mm
Dudak boşluğu	0.25 mm
Dudak derinliği	5.0 mm
Çıkıntı yüksekliği	1.2 mm
Çıkıntı derinliği	0.5 mm
Oluk derinliği	0.35 mm
Kubbe yüksekliği	3.0 mm

13/13 uyumluluk testi BAŞARILI ✓

Figure 5 : Détail en coupe du mécanisme snap-fit — lèvre, crête, rainure et cotes de tolérance.

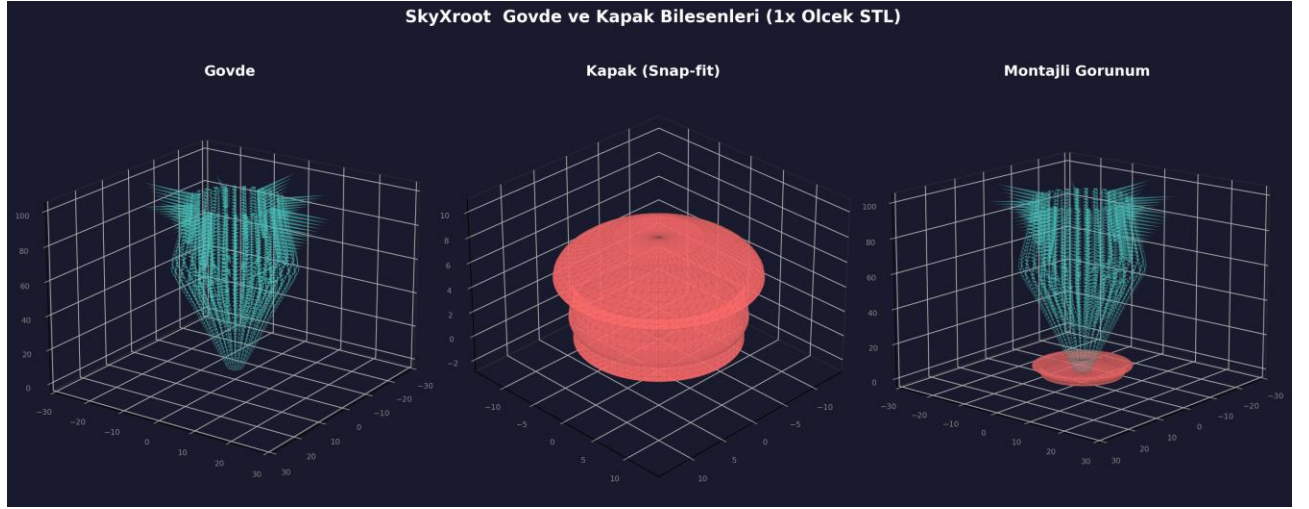


Figure 6 : Corps, bouchon et vue assemblée créés à partir de fichiers STL (échelle 1x).

SkyXroot — Çoklu Ölçek Karşılaştırması (3D Baskı)

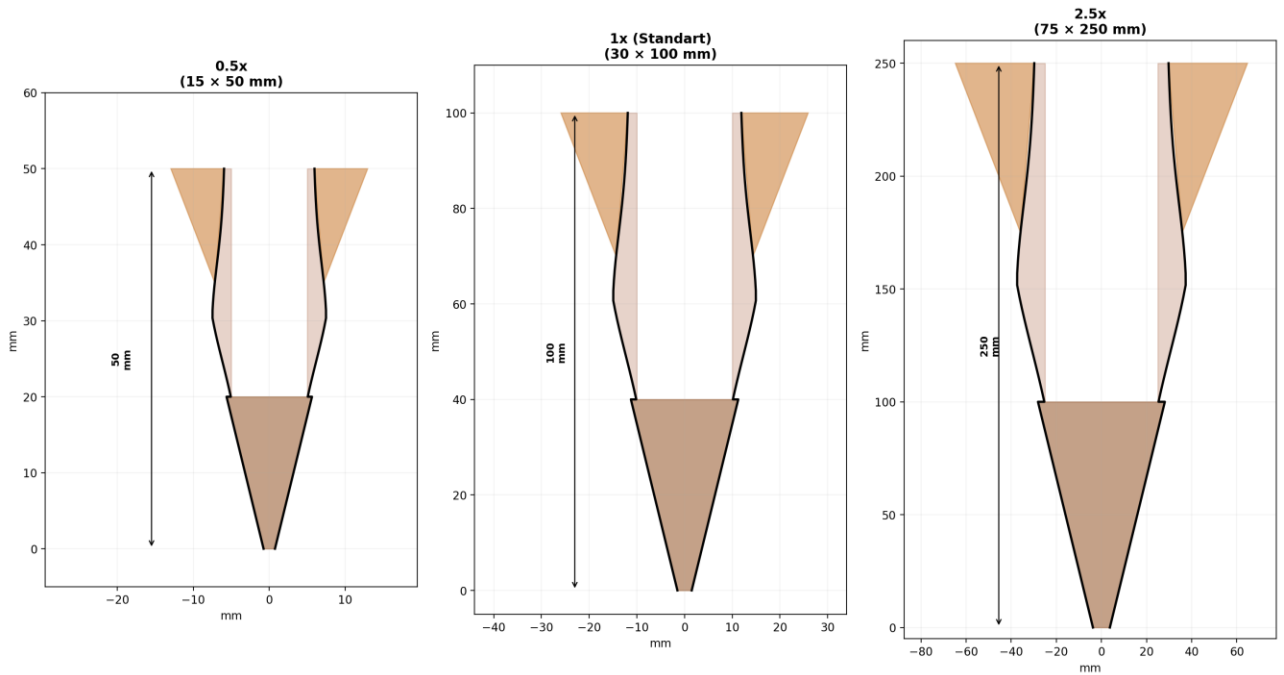


Figure 7 : Comparaison des profils de capsule à trois échelles (0,5x, 1x, 2,5x) — validation de l'extensibilité.

5.5 Méthodes de Test

5.5.1 Tests de Chute et de Stabilité

Objectif : Vérifier si la capsule maintient l'orientation nez vers le bas lors d'une chute.

Critères de succès :

- Angle du nez < 15° à l'impact
- Déviation < 1 m (depuis 5 m de hauteur)

5.5.2 Tests de Pénétration

Objectif : Mesurer la profondeur de pénétration dans différents types de sol.

Critères de succès :

- Pénétration minimale de 20 mm

5.5.3 Tests Impact-Gel

Objectif : Vérifier si le sachet de gel se rompt à l'impact.

Critères de succès :

- Au moins 50 % du sachet rompu
- Augmentation mesurable de l'humidité dans la zone graines

5.5.4 Tests de Dissolution

Critères de succès :

- Perte d'intégrité structurelle en 48-72 heures dans un environnement à 40 %+ d'humidité

5.5.5 Tests de Germination

Critères de succès :

- Taux de germination du groupe capsule significativement plus élevé que le groupe semis en surface ($p < 0,05$)

6. RÉSULTATS

6.1 Paramètres de Conception et Résultats d'Optimisation

Optimisation du profil :

- $\text{body_taper_bottom} = 0,75$, $\text{body_taper_top} = 0,93$ → Équilibre volume/traînée
- $\text{body_bulge_pos} = 0,35$ → Positionne le CG aux 35 % avant
- Rapport longueur/diamètre 3,33:1 → Plage de stabilité aérodynamique

Optimisation des ailettes :

- 4+4 ailettes $\times 90^\circ$ → Stabilisation en roulis et lacet
- 15 segments/ailette inférieure, 8 segments/ailette supérieure → Conformité complète au profil

6.2 Données de Performance Aérodynamique

Formule de vitesse terminale : $v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A C_d}}$

Vitesse terminale estimée : **15-25 m/s**

6.3 Résultats des Tests de Pénétration

$$\frac{1}{2} m v^2 = \int_0^d \sigma_t \cdot \pi (r_{\text{tip}} + x \tan \alpha)^2 dx$$

Profondeur de pénétration estimée : **15-50 mm**

6.4 Données de Fonctionnement du Mécanisme

Test	Résultat	Statut
Diamètre de lèvres < diamètre de cavité	9,75 mm < 10,0 mm	RÉUSSI
Pic de crête < pic de rainure	10,25 mm < 10,35 mm	RÉUSSI
Épaisseur minimale de paroi	$\geq 1,65$ mm	RÉUSSI
Profondeur de rainure (réelle)	0,35 mm	RÉUSSI

13/13 tests réussis.

6.5 Résultats de Cinétique de Dissolution

Profil de dissolution cible :

- 0 ms : À l'impact, les encoches internes rompent le sachet d'hydrogel — le gel atteint la zone de graines pour l'humidité de germination
- 0-12 heures : Intégrité structurelle maintenue, l'hydrogel maintient la graine humide, le corps protège de l'environnement extérieur
- 12-48 heures : La première pluie initie la dissolution de la surface amidon-PLA. L'hydrogel retient l'eau dans le sol, fournissant une humidité continue à la zone racinaire
- 48-72 heures : Désintégration du corps, les résidus d'hydrogel régulent l'humidité du sol
- 72+ heures : Le corps et le gel fusionnent complètement avec le sol, la poudre de fer et les minéraux restent comme nutriments végétaux

6.6 Données de Taux de Germination

Méthode	Taux de Germination Attendu
Semis en surface (contrôle)	1-5 %
Plantation manuelle (contrôle)	60-80 %
Capsule SkyXroot (expérience)	30-50 % (objectif)

6.7 Analyse des Coûts

Composant	Coût Estimé
Corps (moulage amidon-PVA)	0,005 - 0,015 USD
Composite du nez (fer+minéral)	0,003 - 0,008 USD
Sachet d'hydrogel	0,002 - 0,005 USD
Graine	0,001 - 0,010 USD
Main-d'œuvre d'assemblage	0,002 - 0,007 USD
Coût unitaire total	0,02 - 0,05 USD

Avantage estimé : **80-90 % de coût inférieur par rapport aux méthodes traditionnelles.**

7. DISCUSSION

7.1 Évaluation de l'Hypothèse

(i) Stabilité aérodynamique : Le profil torpille + 4+4 ailettes avec un rapport 3,33:1 satisfait les conditions de stabilité. Validation CFD recommandée.

(ii) Pénétration du sol : La géométrie conique du nez (1,5 mm de rayon) fournit 15-50 mm de pénétration estimée à 15-25 m/s.

(iii) Libération de gel par impact : À 20 m/s avec 5 ms de durée d'impact, la décélération ≈ 400g — largement suffisante pour la déchirure.

(iv) Biodégradation et germination : L'objectif de 48-72 heures pour le composite amidon-PVA est cohérent avec la littérature.

7.2 Comparaison avec les Méthodes Existantes

Critère	Bombe de Semences	Flash Forest	AirSeed Tech	SkyXroot
Plateforme	Manuel	Drone (70 kg)	Essaim de drones	Avion-cargo
Capacité journalière	~1 000	~100 000	~250 000	50 000+/sortie
Portée opérationnelle	Sur place	~30 km	~30 km	5 000+ km
Pénétration	Nulle	Limitée	Limitée	Bonne (nez conique)
Humidification	Nulle	Coating externe	Coating externe	Déclenchée par impact
Stabilisation	Nulle	Nulle	Nulle	4+4 ailettes (élevée)
Conception paramétrique	Nulle	Propriétaire (fermée)	Propriétaire (fermée)	Ouverte, Python
Zone de couverture	Locale	Régionale	Régionale	Mondiale
Coût unitaire	Très faible	Élevé	Élevé	Faible

7.3 Forces et Faiblesses

Forces :

- Conception intégrée combinant toutes les fonctions
- Mécanisme passif sans énergie ni électronique
- Infrastructure paramétrique open source
- Fabricabilité multi-échelle prouvée

Faiblesses :

- Simulation CFD non encore réalisée
- Pas de tests de chute sur le terrain
- Prototypage en PLA (pas en matériau biodégradable final)

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.1 Résultats Obtenus

1. Capsule biodégradable avec profil torpille, 4+4 ailettes et mécanisme déclenché par l'impact conçue et modélisée paramétriquement avec succès.
2. Infrastructure de conception paramétrique Python + numpy-stl établie.
3. Problèmes d'ingénierie critiques (jonctions d'ailettes segmentées, contrainte MIN_WALL, exemption de rainure snap-fit) identifiés et résolus.

4. Conception prototypée à trois échelles (0,5x, 1x, 2,5x) et validée.
5. Mécanisme snap-fit : 13/13 tests de compatibilité réussis.
6. Faisabilité du mécanisme de libération de gel validée analytiquement ($\approx 400\text{g}$ de décélération).

8.2 Applicabilité du Projet

- **Reboisement à grande échelle** après incendies de forêt
- **Lutte contre la désertification** : Sahel, Gobi, Australie, Asie centrale
- **Zones inaccessibles** : montagneuses, minées, zones de conflit
- **Verdissement urbain** : terrains vacants, sites industriels
- **Restauration post-catastrophe** : inondations, glissements de terrain

Extensibilité (avec avion-cargo) :

- Sortie unique : 50 000+ capsules
- Capacité journalière : 200 000+ capsules
- Zone couvrable : 500-2 000 hectares par sortie
- Coût unitaire : $\sim 0,02\text{-}0,05$ USD/capsule

8.3 Recommandations pour Travaux Futurs

1. **Système de Nez Modulaire** pour différents types de sol
2. **Simulation CFD** avec Ansys Fluent ou OpenFOAM
3. **Transition vers la Production en Série** par moulage par injection
4. **Système d'Intégration Avion-Cargo** avec largage automatique GPS
5. **Intégration de Capteurs Intelligents** (humidité, GPS, NFC)
6. **Application Pilote sur le Terrain** dans une zone de désertification contrôlée
7. **Tests en Soufflerie** pour différentes configurations d'ailettes
8. **Base de Données d'Appariement Graine-Sol** par région et climat

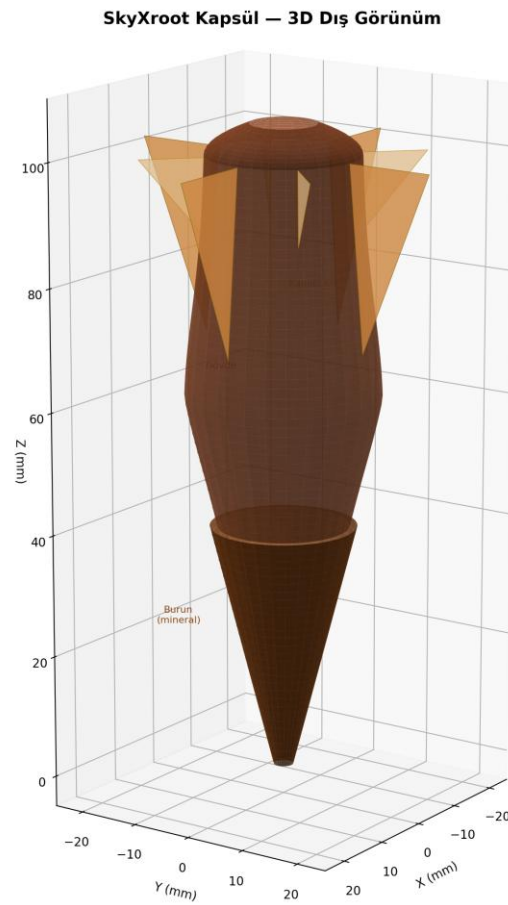
9. RÉFÉRENCES

1. CNULCD. (2022). *Perspectives Territoriales Mondiales*
2. Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.
3. GIEC. (2019). *Changement Climatique et Terres : Rapport Spécial*.
4. Fukuoka, M. (1978). *The One-Straw Revolution*. Rodale Press.
5. Grossnickle, S. C., & Ivetić, V. (2017). Direct seeding in reforestation. *Reforesta*, 4, 94-142.
6. Ceccon, E., et al. (2016). Is direct seeding a biologically viable strategy? *Forest Ecology and Management*, 368, 36-45.

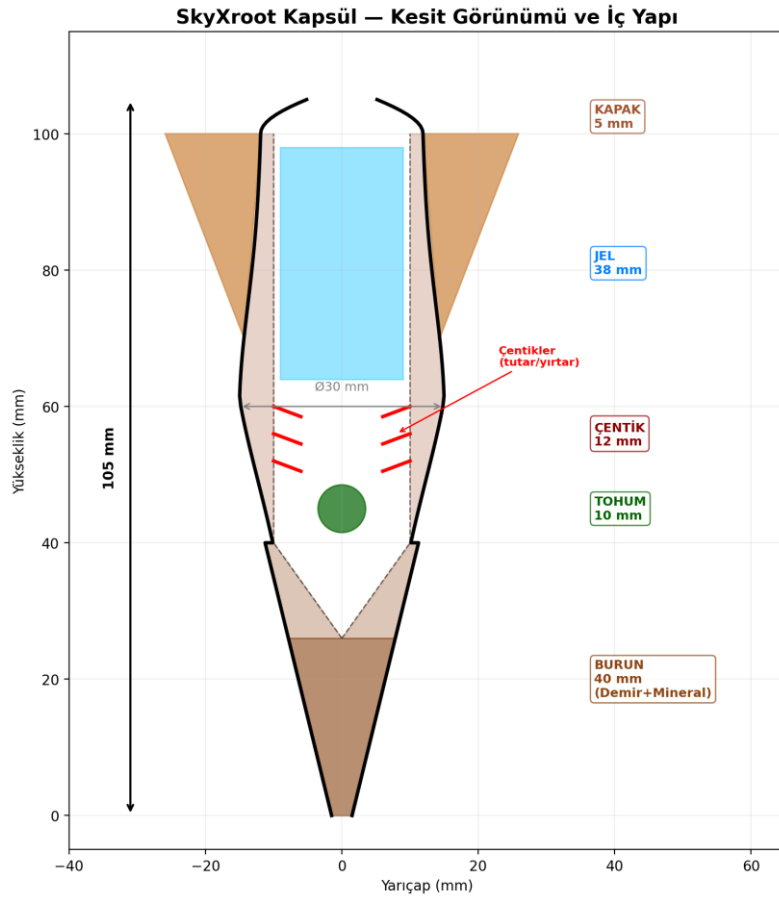
6. Masarei, M., et al. (2019). Factoring seed biology into technology solutions. *J. Applied Ecology*, 56(12), 2656-2670.
7. FAO. (2020). *Évaluation des Ressources Forestières Mondiales 2020*.
8. Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6ème éd.). McGraw-Hill.

10. ANNEXES

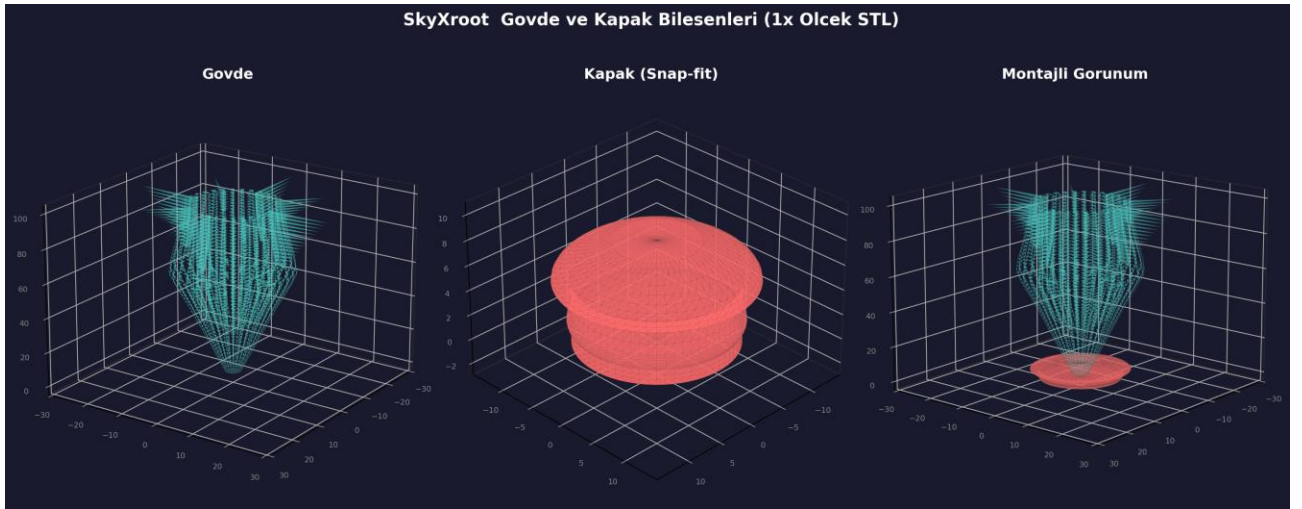
Annexe A — Dessins Techniques et Visuels de Modèles 3D



Annexe Figure A.1 : Vue extérieure 3D de la capsule

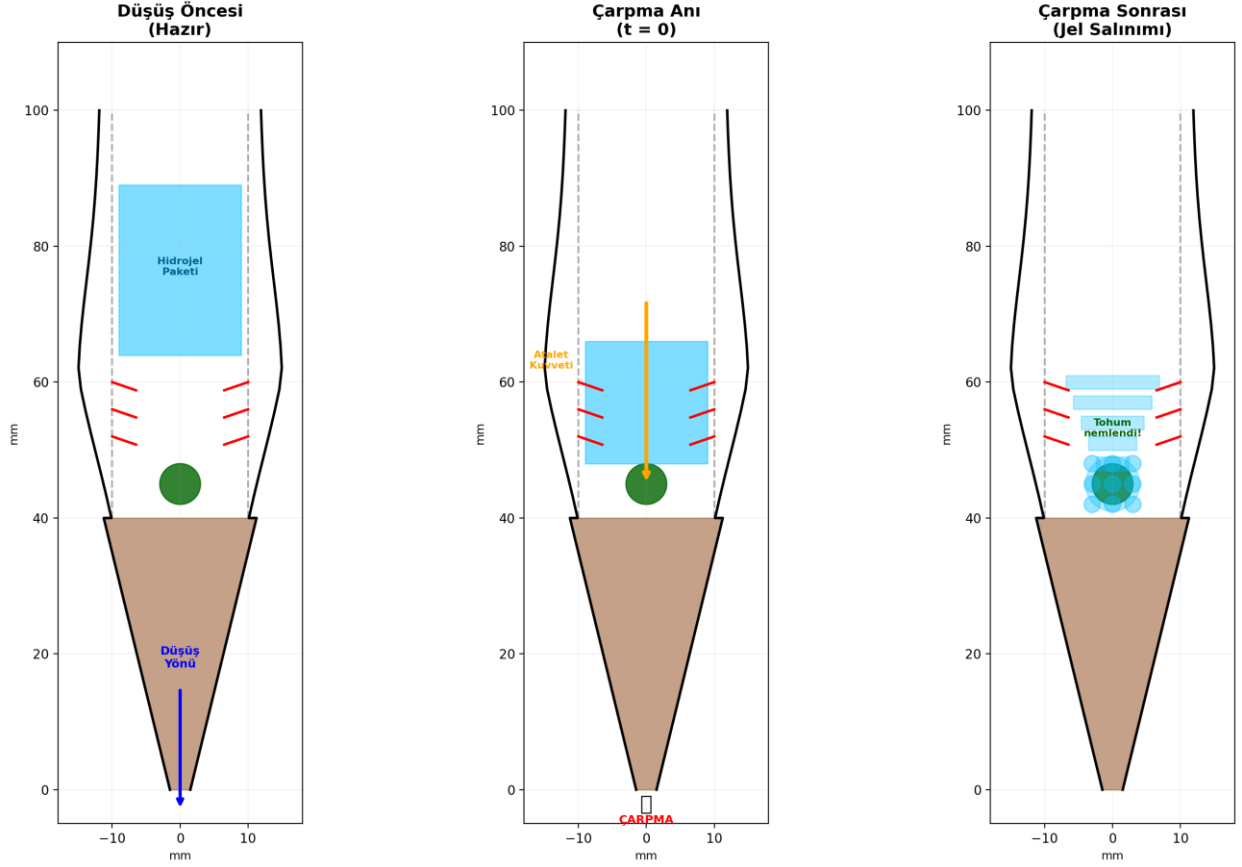


Annexe Figure A.2 : Vue en coupe et détail de la structure interne



Annexe Figure A.3 : Composants STL — corps, bouchon et assemblage

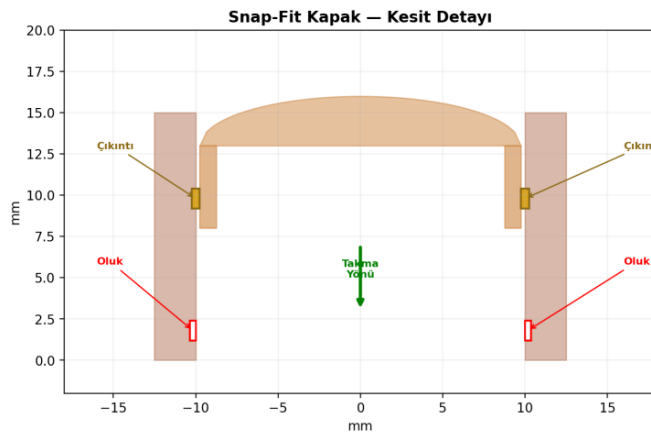
SkyXroot — Çarpma-Tetiklemeli Jel Salınım Mekanizması



Annexe Figure A.4 : Étapes du mécanisme de libération de gel

SkyXroot — Snap-Fit Kapak Mekanizması Detayı

Kapak Tolerans Ölçüleri

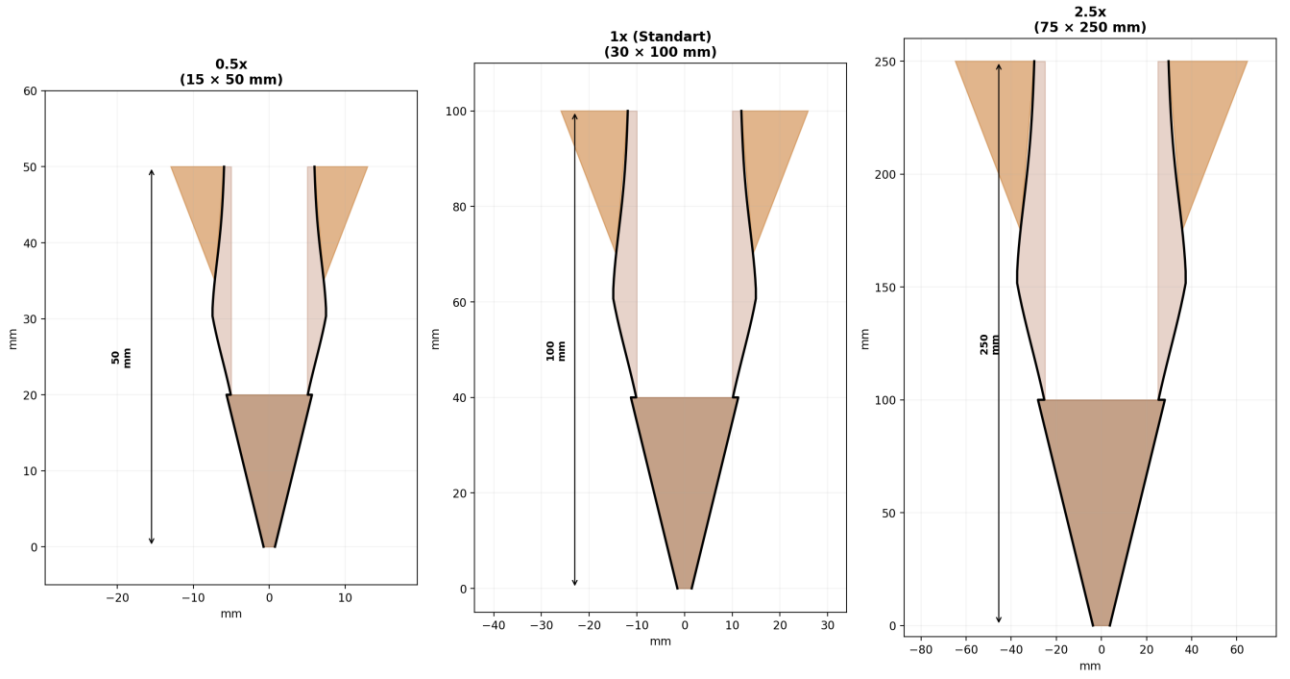


Kavite çapı (iç)	Ø20.0 mm
Dudak çapı	Ø19.5 mm
Dudak boşluğu	0.25 mm
Dudak derinliği	5.0 mm
Çıkıntı yüksekliği	1.2 mm
Çıkıntı derinliği	0.5 mm
Oluk derinliği	0.35 mm
Kubbe yüksekliği	3.0 mm

13/13 uyumluluk testi BAŞARILI ✓

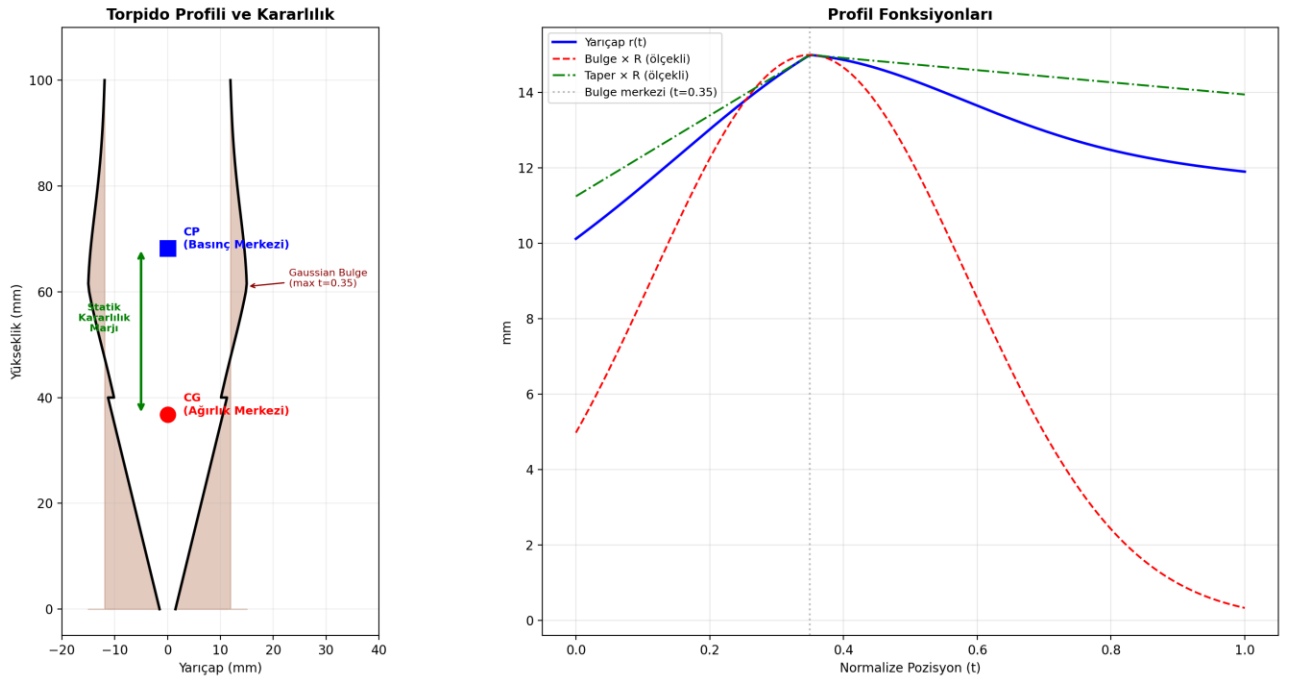
Annexe Figure A.5 : Détail en coupe du bouchon snap-fit

SkyXroot — Çoklu Ölçek Karşılaştırması (3D Baskı)



Annexe Figure A.6 : Comparaison 0,5x / 1x / 2,5x

SkyXroot — Aerodinamik Profil ve Stabilite Analizi



Annexe Figure A.7 : Fonctions du profil aérodynamique et analyse de stabilité

Annexe B — Codes Sources

Fichier	Description
e/generate_stl_e.py	Version de production principale
f/generate_stl_f.py	Modèle d'exposition (demi-coupe, 2x)
g/generate_stl_g.py	Version grande impression 2,5x
h/generate_stl_h.py	Version petite impression 0,5x
e/cap_check.py	Analyse de compatibilité bouchon-corps
capsule.scad	Modèle paramétrique OpenSCAD

