

Soutenu
par



MINISTÈRE
DE LA CULTURE

Liberté
Égalité
Fraternité



Spolia botanique

Créations végétales recyclées pour des rêveries urbaines

Porteur du projet : Comet Lab (Jeune Entreprise Innovante)
Chef du projet : Mete Kutlu

Partenaires :
Domaine de Chaumont-sur-Loire
Festival international des jardins
ENSA Paris-Belleville
Laboiratoire AUSSer

Lauréat : Appel à projet « Services numériques innovants 2022 »

Période : 27 juin 2022 - 30 avril 2024

Les études et les dessins réalisés dans le cadre de ce projet constituent également une étude de cas dans la recherche doctorale de Mete Kutlu.

www.dreampixels.fr/spolia-botanique

école nationale
supérieure
d'architecture
de **paris-belleville**


Domaine de
Chaumont-sur-Loire

AUsser
umr 3329 du cnrs

SOMMAIRE

1. Présentation générale

Une toile virtuelle des rêveries botaniques	4
Aperçu des productions	6
Hologrammes botaniques pour un château	7
L’artisanat numérique : une recherche doctorale	9
Design immersif	10
Une équipe transdisciplinaire	12

2. Recherches préliminaires

Philosophie de la vie végétale	14
Végétation spéculative	16
Jardins suspendus de Babylone	20
Dans les yeux d’une abeille	22
Macro-photographie ultraviolette	25
Reinterpretations par l’IA	30

3. Déroulement du projet

Numérisation des jardins	33
Optimisation des modèles 3D	39
Classification botanique	40
Recomposition virtuelle	43
Recomposition immersive	46
Développement	48

4. Résultats

Trois applications de réalité augmentée	50
Festum virtual	50
Spolia botanique	52
Floral Tracer	57
Expérience avec une casque	62
Recherches scénographiques et esthétiques	66
Particules d’arômes	66
Hologrammes botaniques	70
Fragments d’un jardin en hologramme	83
Dans les yeux d’une abeille cybernétique	86

5. Bilan final

Évaluation des objectifs	94
Analyse des caractéristiques replicables	95
Modèle « musée immersif »	96
Modèle « design immersif »	97
Facteurs clés de succès	98
Freins au développement	99
Perspectives	101

6. Résultats de l’expérience utilisateur

Expérience utilisateur	103
Implication des utilisateurs	104
Performance technique	105
Impact sur le processus de conception	106
Aspects innovants	108
Valeur éducative	110
Tableau d’évaluation	113
Commentaires des étudiants	115
Bibliographie	116

Présentation générale



Neon Breaker

Echeveria

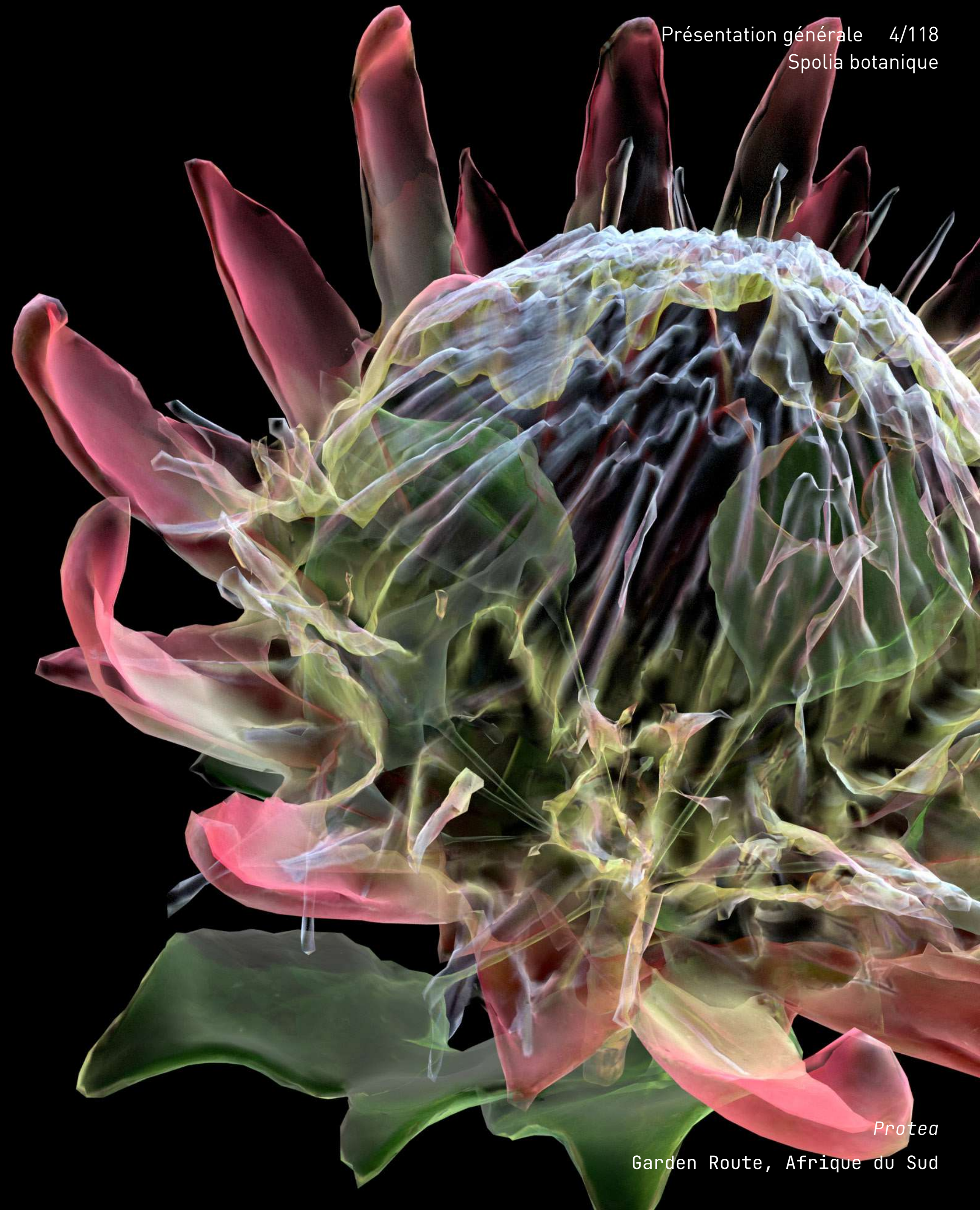
Garden Route, Afrique du Sud

Une toile virtuelle des rêveries botaniques

Spolia botanique invite les étudiants en architecture, ainsi que le grand public, à créer une **toile virtuelle composée de rêveries botaniques** qui s'imbriquent dans les rues et dans les places de nos villes. Grâce à des applications mobiles ludiques et à des expériences immersives, notre projet vise à initier une collaboration à l'échelle mondiale et à stimuler la réflexion sur **l'avenir botano-numérique** de nos environnements urbains. En révélant le **potentiel végétal de nos villes**, il illustre la possibilité d'un **avenir hybride et chlorophyllé**, marqué par une **renaissance florale** que nous pouvons amorcer dans nos réflexions urbaines et technologiques.

Ces applications expérimentales permettent aux utilisateurs, où qu'ils soient dans le monde, de transformer leur quartier en une **utopie végétale** et de s'y promener en réalité augmentée. Toute personne équipée d'un smartphone peut ainsi explorer ce nouveau type d'espace urbain à travers une « **balade botanique augmentée** », où se fusionnent l'espace physique et l'espace virtuel, ainsi que la botanique et le numérique.

Nous souhaitons offrir aux résidents un moyen intuitif de guider et de modeler l'imaginaire urbain de leur propre ville. L'habitant de la ville contemporaine serait ainsi redéfini à travers les figures de **l'Homo ludens et de l'Homo faber** (l'homme qui joue et l'homme qui fabrique), telles que décrites dans la littérature utopiste, envisageant l'espace urbain comme un lieu d'**échanges créatifs et ludiques**.



Protea
Garden Route, Afrique du Sud

Spolia signifie en architecture le réemploi de matériaux ou de fragments de bâtiments existants comme matériaux de construction dans de nouvelles structures. En proposant une interprétation botanique et virtuelle du terme 'spolia', nous créons des **clones virtuels du monde végétal** en les numérisant en 3D, pièce par pièce. Ces **jardins virtuels recyclés** deviennent ensuite notre ressource principale, à l'instar de la brique et de la pierre, pour transformer la ville en une rêverie botanique immersive, immédiate et collaborative.

Ce projet a été mené en partenariat avec le Domaine de Chaumont-sur-Loire, l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Belleville, et l'unité mixte de recherche AUSser. L'école a servi de lieu d'expérimentation pour les étudiants, tandis que l'UMR AUSser a été chargée de la diffusion et de la valorisation scientifique des résultats. Le festival nous a offert une occasion unique d'acquérir notre ressource première.



Dahlia pinnata

3 applications de réalité augmentée

2 vidéos d'animation

Aperçu des productions



Festum virtual

Musée immersif
*Découverte des
numérisations 3D*



Spolia botanique

Musée immersif
*Découverte des
recompositions botaniques*



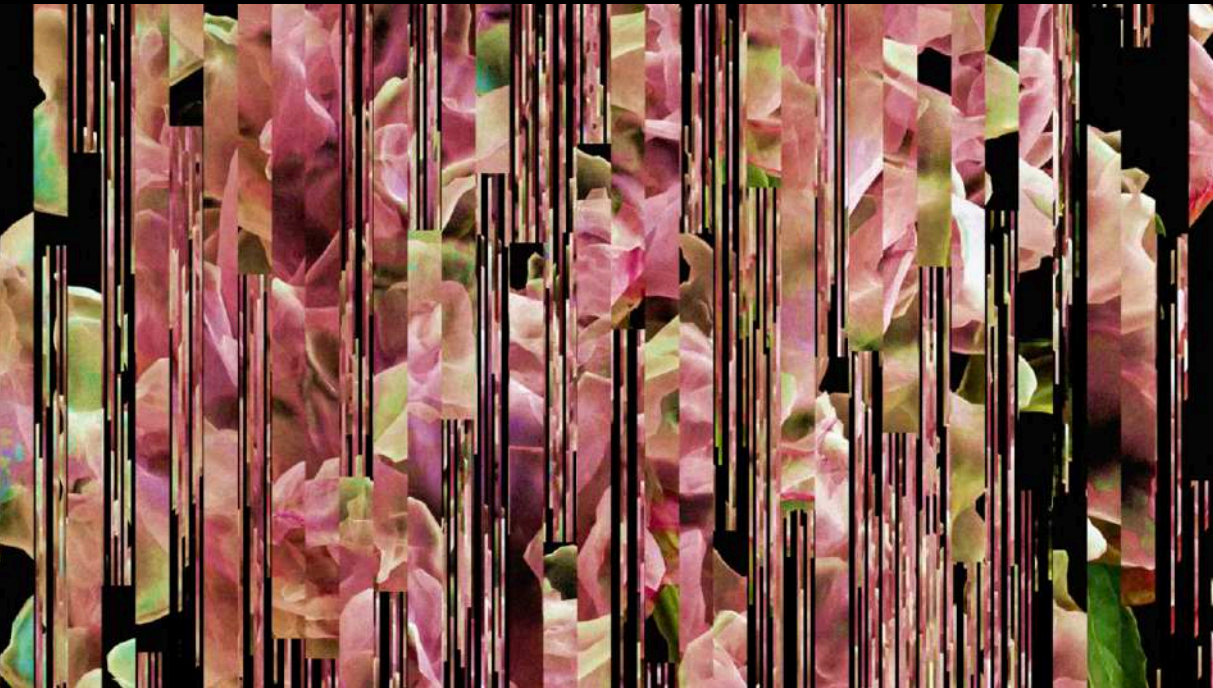
Floral Tracer

Design immersif
*Création des jardins
en réalité augmentée*

Outil pédagogique



Présentation des applis



Fragments d'un jardin
en hologramme

Pièce d'exposition

Hologrammes botaniques pour un château

En 2022, Comet Lab a eu l'honneur de figurer parmi les 20 lauréats sélectionnés pour concevoir un jardin lors du Festival International des Jardins, organisé par le Domaine de Chaumont-sur-Loire. Parallèlement à ce projet de jardin, nous avons établi un partenariat avec le Domaine pour développer une seconde initiative : 'Spolia botanique', une intervention artistique et numérique dans les jardins du festival.

Depuis 1992, le Festival International des Jardins organisé au Château de Chaumont-sur-Loire s'est imposé comme un laboratoire de la création contemporaine dans le domaine des jardins et de l'aménagement paysager à l'échelle mondiale. Véritable incubateur d'idées, le festival revitalise l'art des jardins, captivant à la fois le grand public et les professionnels par l'introduction de nouvelles plantations, de matériaux innovants et de concepts et méthodes avant-gardistes.



Château de Chaumont-sur-Loire
Région Centre-Val de Loire

Le Jardin d'Eaurmus, conçu pour ce festival, offre une promenade autour d'une fontaine menhir qui génère une série de vortex pour redynamiser l'eau à l'échelle atomique, en agitant ses molécules. Comme les 19 autres jardins temporaires, il a été démonté après six mois pour faire place aux nouvelles créations des lauréats.

Afin de préserver ces œuvres éphémères, nous avons numérisé en 3D certains segments, créant ainsi une archive botanique tridimensionnelle. Ces numérisations, destinées à produire des modèles 3D de haute résolution, sont capables de capturer la richesse végétale et minérale des jardins. Ces fragments virtuels ont ensuite été intégrés dans l'application « Festum Virtua », qui permet une exploration immersive de ces jardins.

Le jardin d'Eaurmus, Comet Lab
Lauréat du Festival international de jardins
du Domaine de Chaumont-sur-Loire en 2022



L'artisanat numérique : une recherche doctorale

Le projet « Spolia Botanique » explore, dans le domaine de l'architecture, la notion d'**artisanat numérique** qui marque un rapprochement entre l'ère artisanale et l'ère numérique. Cette approche s'inscrit dans le contexte de théories contemporaines telles que le **médiévalisme post-moderne**, l'**archaïsme numérique** et le futur primitif, proposés par des penseurs comme Régis Debray et Jacques Lucan, ainsi que par des architectes tels que Sou Fujimoto et Toyo Ito. Ce sujet est également central dans la thèse de Mete Kutlu, porteur de ce projet et ancien boursier de la Villa Médicis, comme il le développe dans son article « Une recherche trans-temporelle en architecture », publié dans la revue *Culture et Recherche* (n° 141, 2020). Ce projet constitue une étude de cas exceptionnelle pour son doctorat, dont la soutenance est prévue pour octobre 2024.

Traditionnellement, l'architecte conçoit ses projets à travers des représentations miniaturisées, souvent dans son bureau, éloigné du site de construction. Notre application de réalité augmentée change cette dynamique en permettant de concevoir le projet directement sur le site et à échelle réelle. L'architecte est ainsi immergé dans l'environnement qu'il crée, ce qui instaure un **rapport plus intime et immédiat** avec le site du projet, rapprochant le processus de conception de la **réalité spatiale et sensorielle du lieu**.

L'utilisation de la réalité augmentée renouvelle le **lien intuitif et actif** qu'entretenait le **maître-bâisseur médiéval** avec son chantier, un lieu de collaboration avec les artisans où les imaginaires invisibles se croisaient. Ce renouveau technologique modifie le paradigme architectural établi depuis la Renaissance italienne, qui voit l'architecte transposer son imaginaire sur papier par des dessins systématiques et abstraits.



Numérisation d'une colonnette émaillée,
Mete Kutlu, Samarkand, Ouzbékistan, 2022

Design immersif

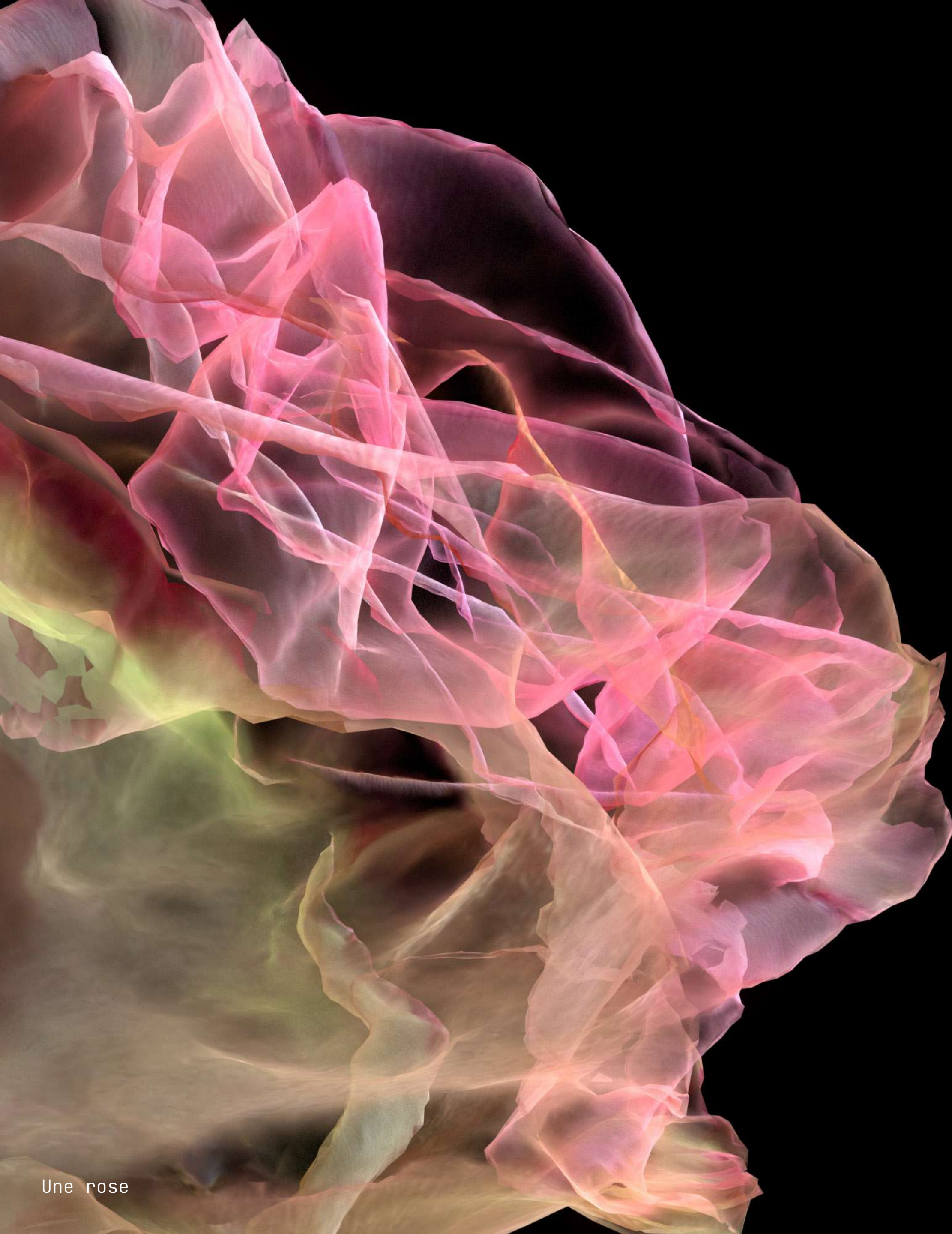
Comet Lab propose aux étudiants en architecture une application mobile qui leur permet de concevoir une **augmentation botanique et virtuelle de l'espace urbain**. Nous cherchons à explorer les questions suivantes :

Comment peut-on concevoir de manière immersive, à travers les outils de réalité augmentée, les habitats futurs où s'entremêlent l'espace physique et l'espace virtuel ?

Comment pouvons-nous transformer nos villes contemporaines en scénarios urbains utopiques, augmentés par des **jardins suspendus virtuels** ?

Comment envisager une extension virtuelle d'un bâtiment physique, telle qu'une nouvelle façade virtuelle pour un immeuble haussmannien, ou **une peau urbaine botanique qui serait variable, adaptable et personnalisable** selon les désirs de chaque habitant ?





L'expérience avec notre application de design immersif constitue un **exercice intellectuel essentiel** pour anticiper **l'évolution de la figure de l'architecte** et de ses outils à l'ère de l'intelligence artificielle. Elle nécessite de réfléchir dans un environnement hybride et inédit, à la frontière entre le monde réel et le monde virtuel. La principale contrainte réside dans la nécessité d'une intégration précise des constructions virtuelles avec les bâtiments et décors urbains existant dans l'espace physique. Cette contrainte oblige l'architecte à **opérer simultanément dans les deux mondes**, à percevoir l'espace virtuel comme une extension directe de l'espace naturel et, finalement, à considérer ces deux espaces comme un **continuum fluide et symbiotique**.

Une équipe transdisciplinaire

Mete Kutlu : porteur du projet, architecte, artiste et doctorant à l'Université Paris-Est. Spécialisé dans le développement, la modélisation et la photogrammétrie, sa thèse porte sur la réalité augmentée et les cultures médiévales de l'espace architectural. Ancien boursier de la Villa Médicis, de l'École française à Rome, de l'Institut français des études anatoliens, de l'Institut français de l'Asie central et de la Fondazione Giorgio Cini, il est actuellement enseignant à l'ENSA Paris-Belleville.

Theuns Botta : développeur spécialisé dans les applications de réalité augmentée.

Émilien François : développeur web, spécialisé dans la création des plateformes en ligne immersives

Dilara Baskoylu : artiste numérique spécialisé dans l'intelligence artificielle.

Cem Karahan Aydin : designer sonore spécialisé dans la création des ambiances sonores spatiales.

Experts :

Cristiana Mazzoni : architecte, urbaniste et professeure en ville et territoire à l'ENSA Paris-Belleville (partenaire du projet). Elle est également la directrice de thèse de Mete Kutlu qui porte le projet. En tant que directrice de l'unité mixte de recherche AUSser (MC-CNRS 3329, partenaire du projet), elle suit de près l'évolution et l'avancement de notre projet avec son expertise sur l'urbanisme, les questions écologiques dans les métropoles contemporaines, l'enseignement en architecture et la recherche académique.

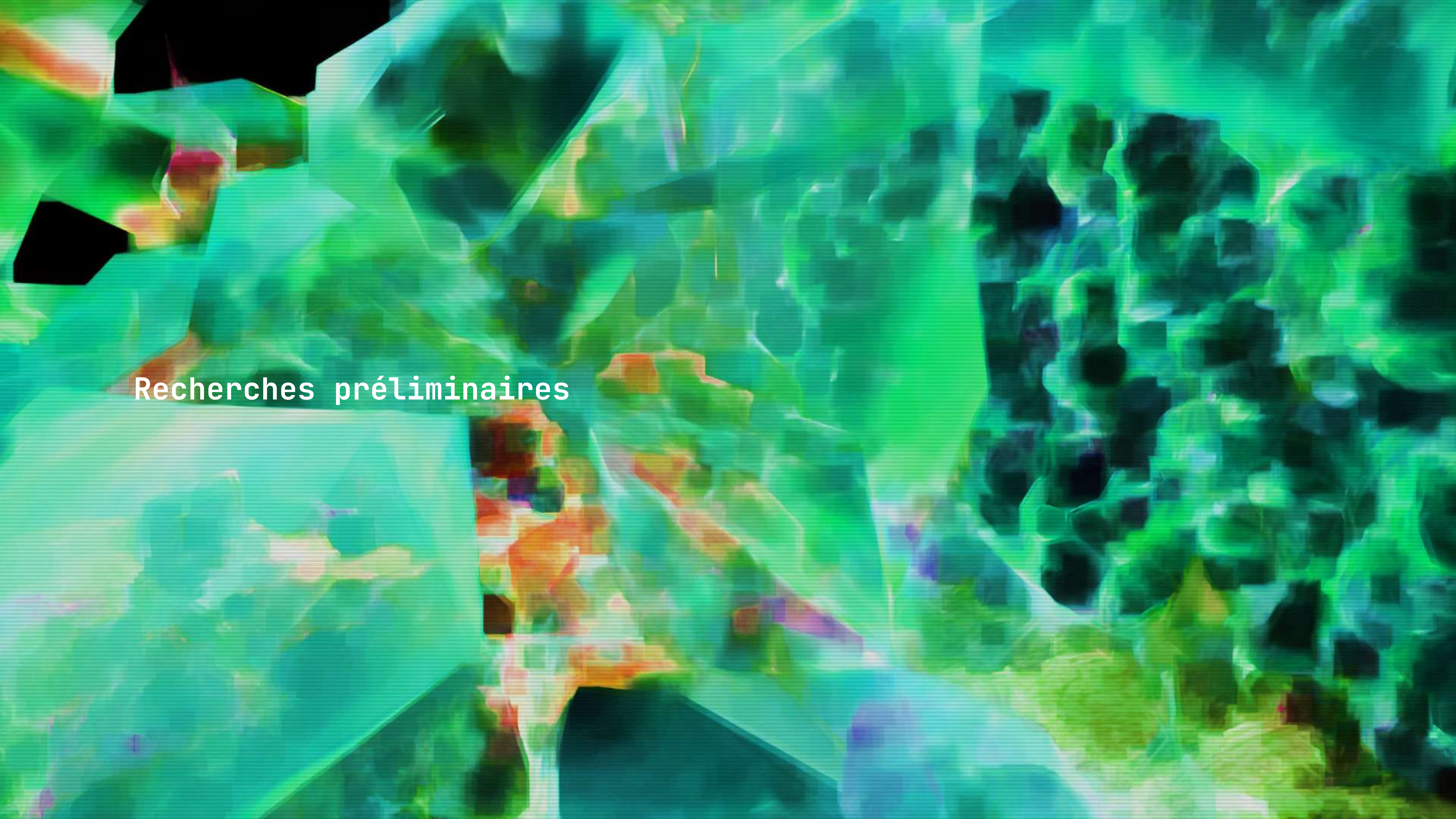
Jean-Louis Sivade : ingénieur informatique qui a longtemps travaillé chez IBM France sur l'intelligence artificielle, l'ergonomie informatique et le test des outils numériques. En tant qu'expert informatique, ses conseils et son expertise nous aideront à assurer la qualité ergonomique et technique de notre produit.

Stagiaires :

Tugce Topada : étudiante en architecture. En tant que stagiaire, elle a contribué aux missions de numérisation et diverses étapes de modélisation.

Sahiti Vemavarapu : étudiante en architecture. En tant que stagiaire, elle a contribué aux missions de numérisation et diverses étapes de modélisation.



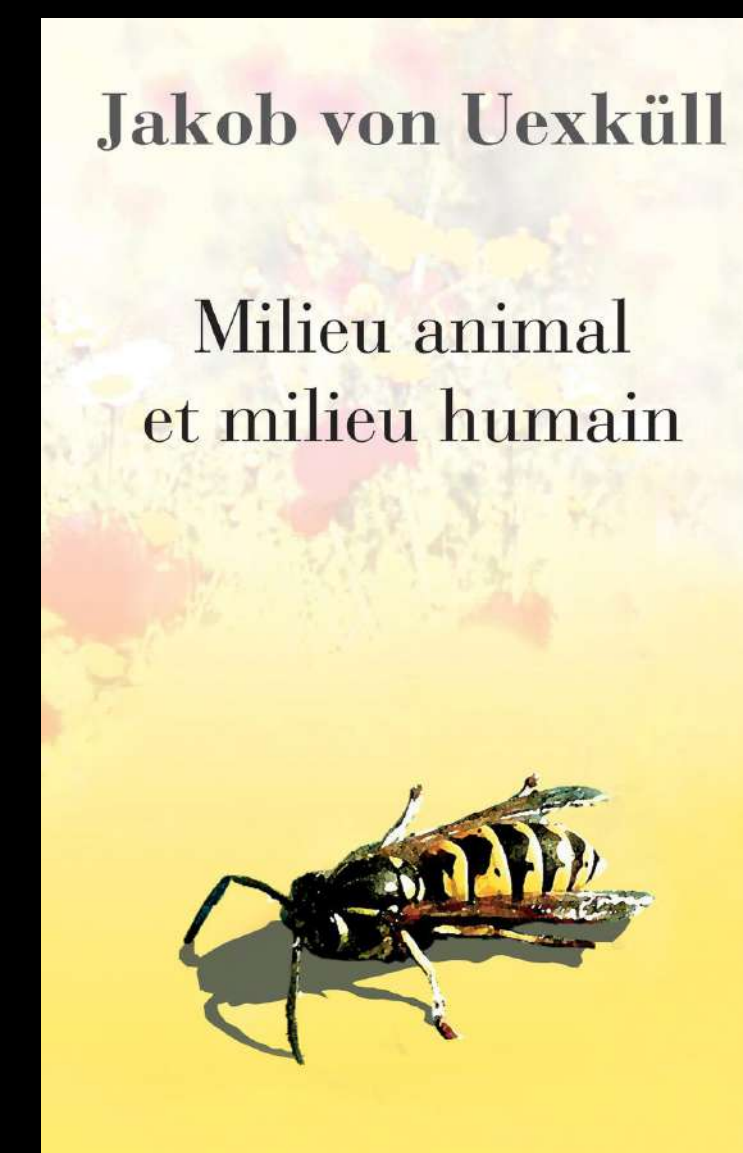
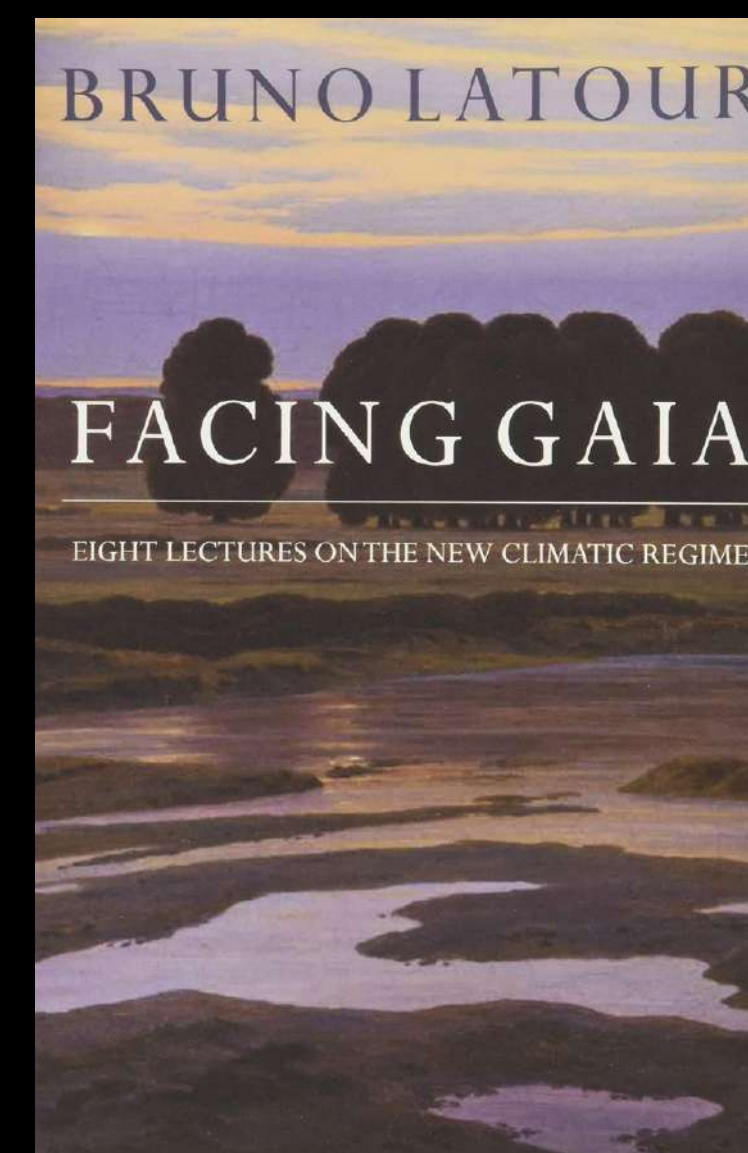
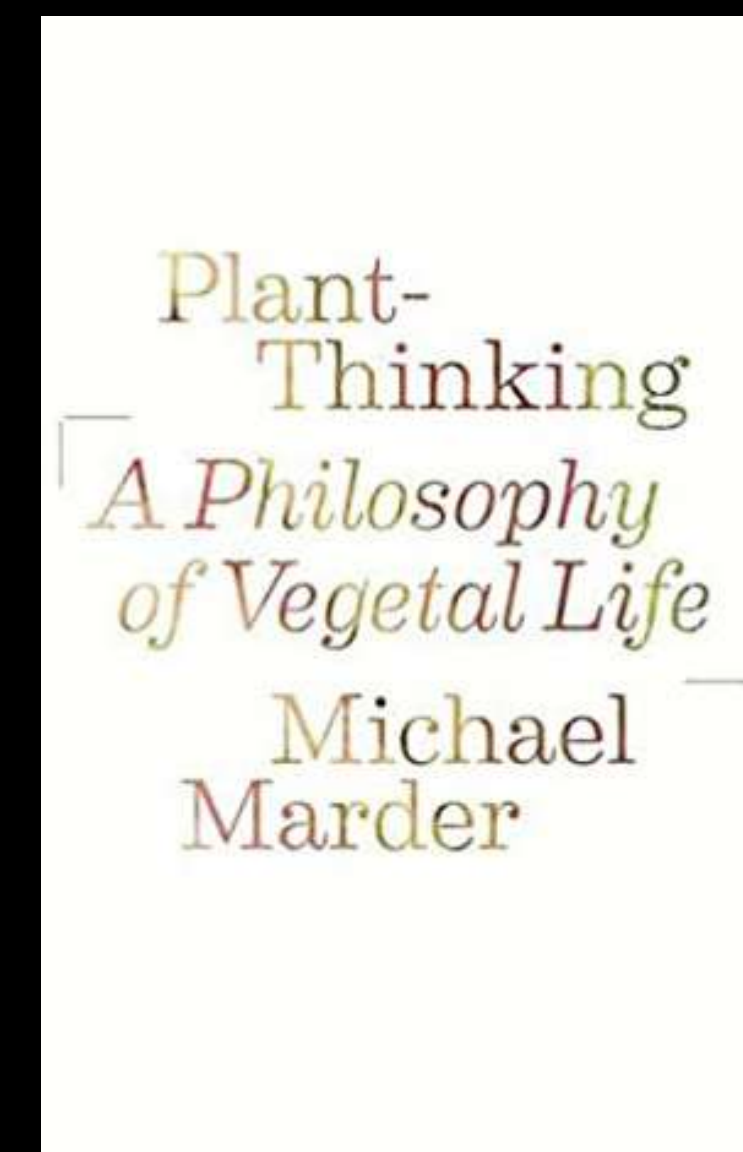
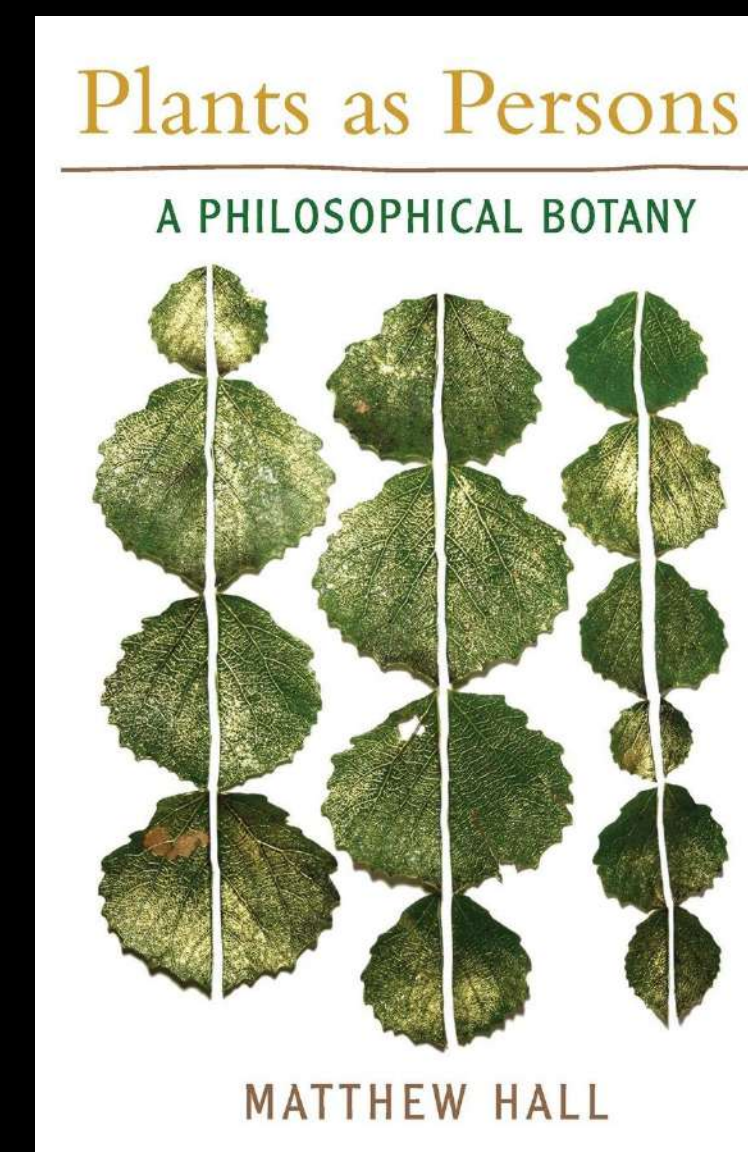
The background is a complex abstract composition. It features a variety of geometric shapes, including triangles, squares, and polygons, in shades of green, blue, and orange. These shapes are layered and overlap, creating a sense of depth. A prominent feature is a grid of small, dark squares that appears to be a reflection or a secondary layer of the composition, located towards the right side. The overall effect is a vibrant, multi-layered visual field.

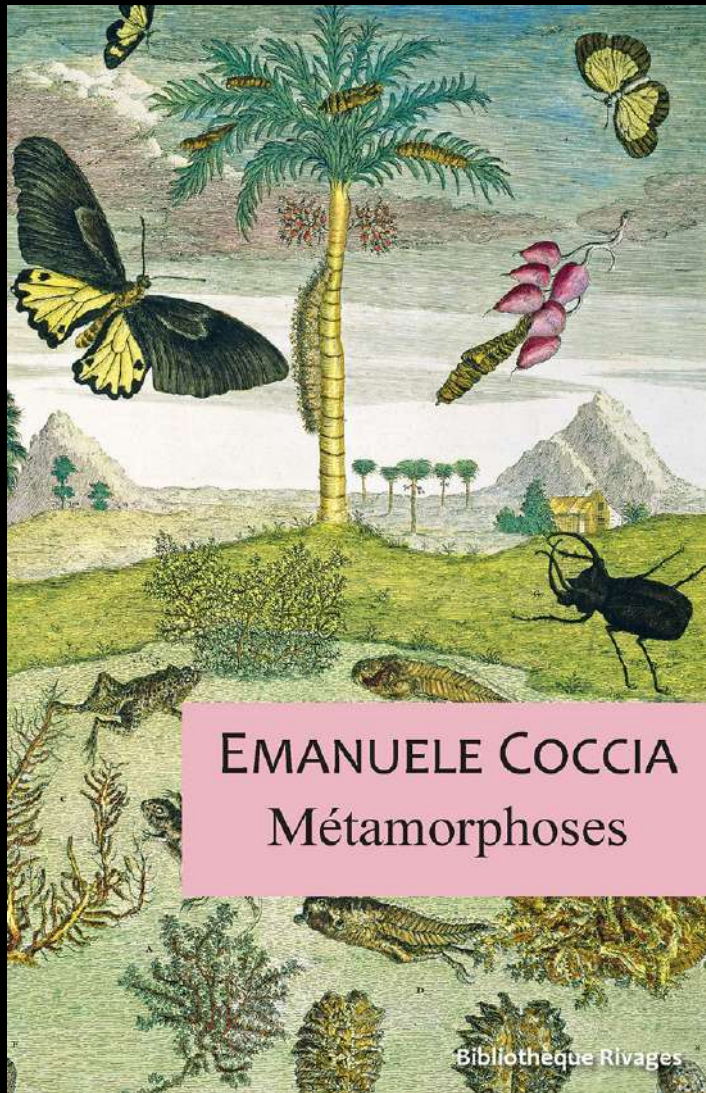
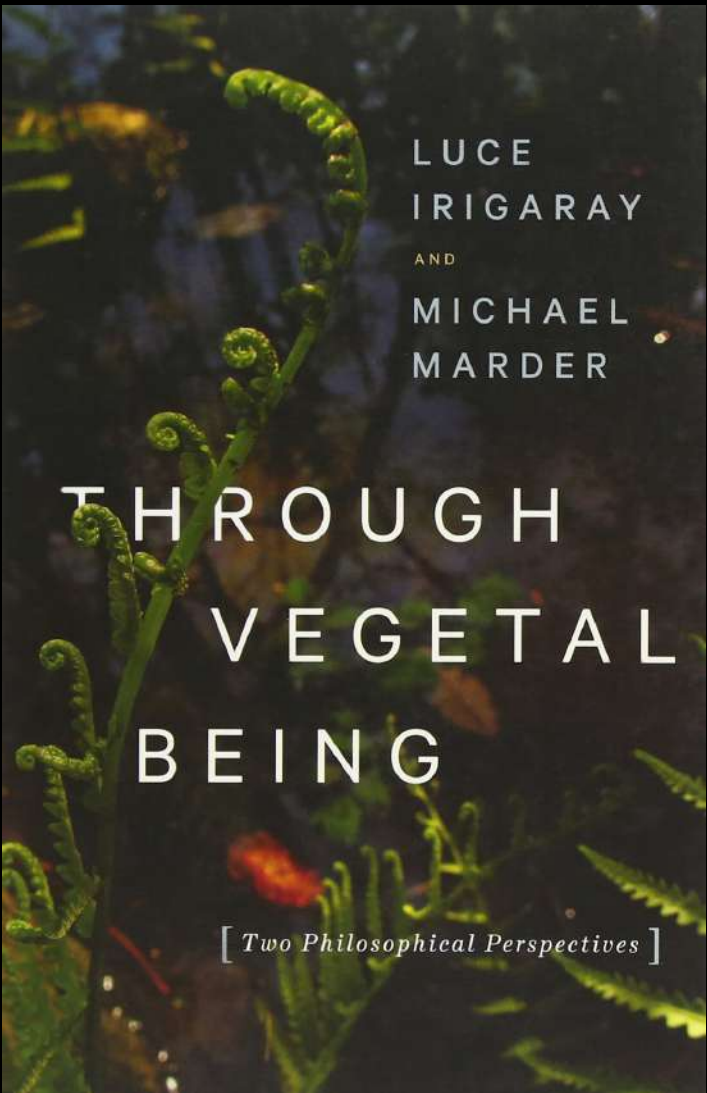
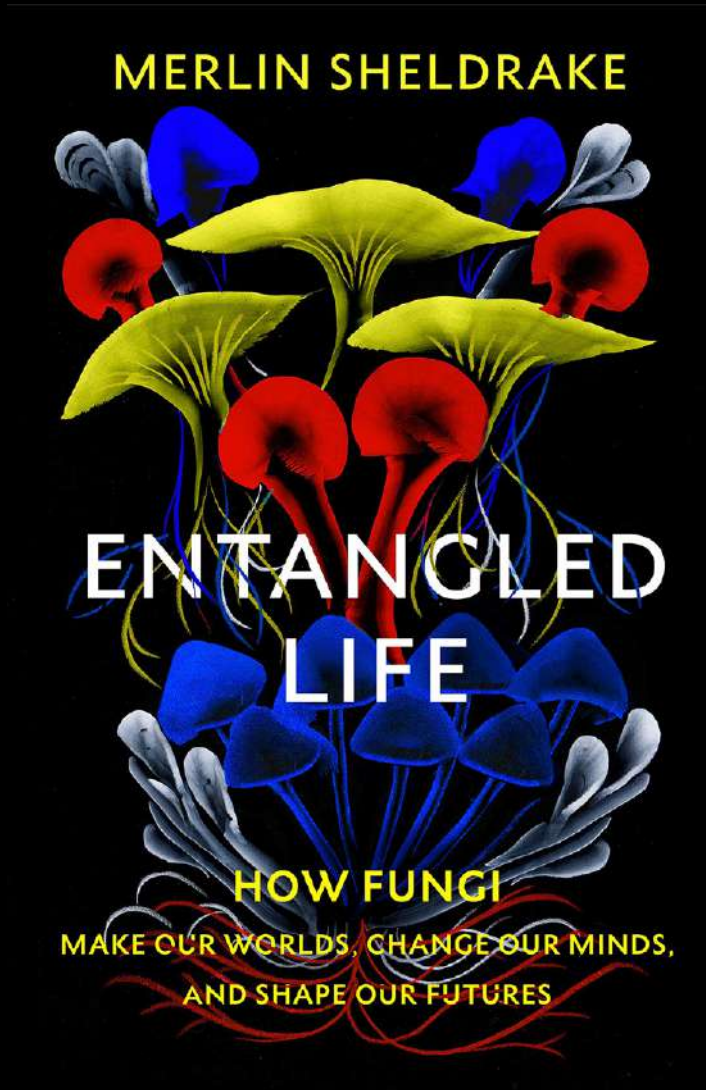
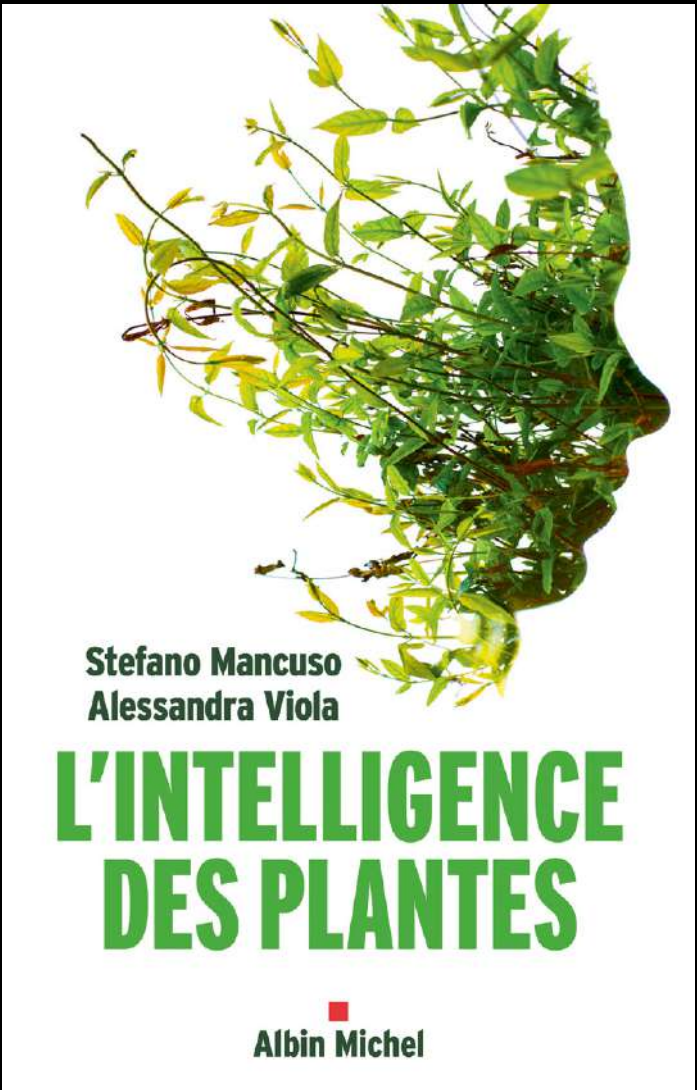
Recherches préliminaires

Philosophie de la vie végétale

L'objectif de cette recherche est d'étudier et d'esquisser les fondements d'une **potentielle alliance entre les mondes botanique et numérique** et d'imaginer les potentiels que cette alliance pourrait représenter pour la conception de nos vies urbaines futures.

Comme nous montre la prolifération actuelle de la littérature scientifique sur la vie artificielle, la **neurobiologie** et **l'intelligence des plantes**, nous sommes en train de revisiter et reformuler nos définitions de notions fondamentales comme « intelligence » et « vie ». Notre recherche vise à étudier et à enrichir ces différents courants de pensée contemporains, comme la **critique posthumaine**, qui intègrent l'ensemble de différentes formes d'intelligence dans une seule **écologie planétaire inclusive**, soit l'intelligence végétale, animale, humaine, ou bien artificielle. Elle permettra également d'approfondir les réflexions sur l'élaboration de nouvelles écoles de conception architecturale et urbaine qui soient non-antropocentriques et qui s'appuient essentiellement sur la **collaboration égalitaire des vies artificielles, végétales et animales**.





Nos recherches sur le domaine de la botanique portent sur les **systemes de communication, d'intelligence et de collaboration interespece** qui nous restent souvent invisibles et élusives. À travers une cartographie expérimentale de l'habitat végétal du monde entomique, nous souhaitons rendre plus concrets ces **réseaux de nature microscopique**, souterraine et volatile avec l'objectif de mettre en évidence la réciprocité entre les différentes espèces cohabitant une écologie. Nous nous posons par exemple les questions suivantes :

- À quoi ça ressemble d'être une fleur de pivoine ?
- Comment une abeille voit-elle le monde ?

La réponse à ces questions nécessite d'abord la réalisation d'une étude sur les capacités sensorielles uniques de certaines plantes et insectes, leurs modes de vie et visions qu'ils ont de l'espace et du temps.

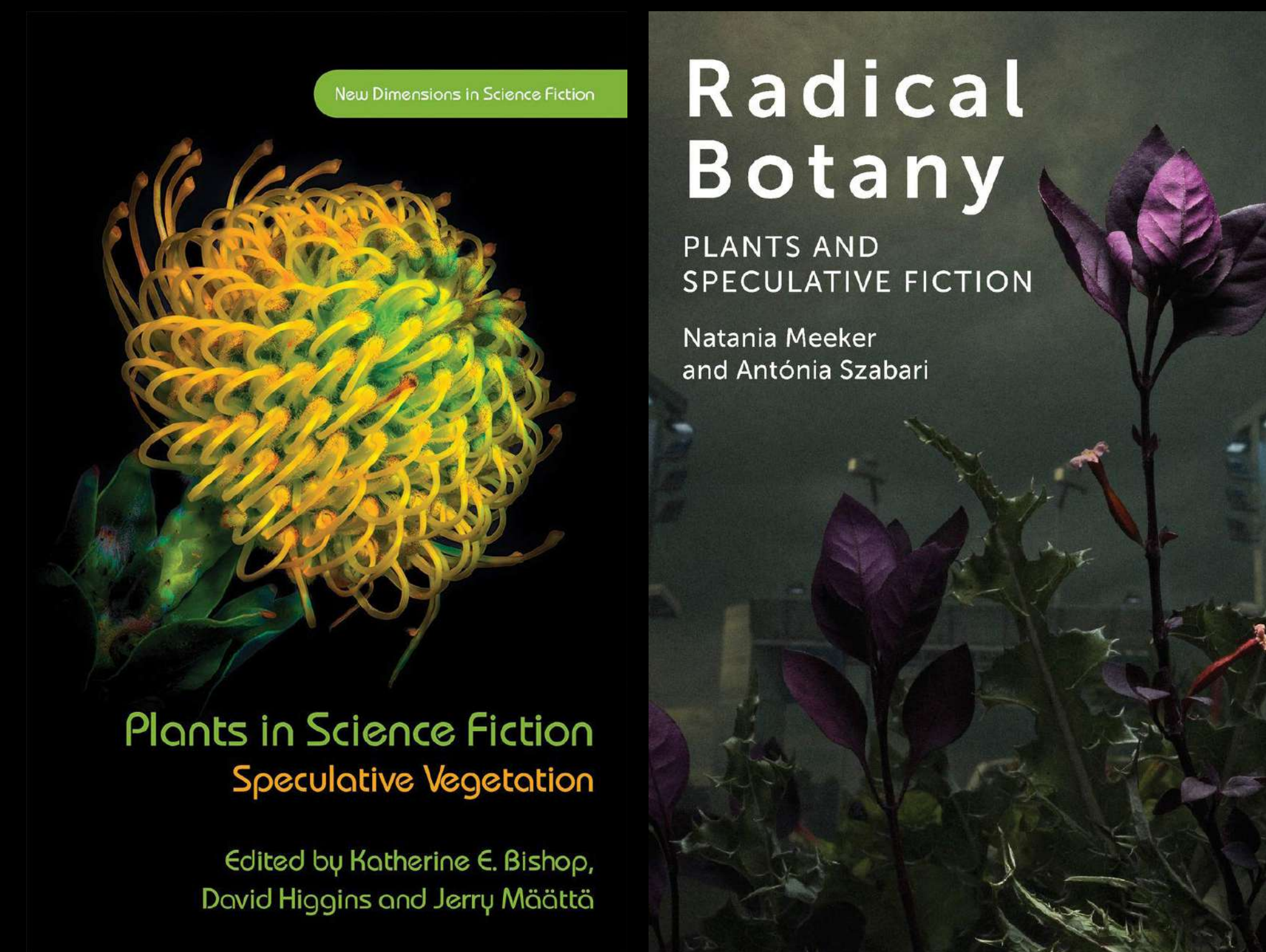
Quelques références de recherches récentes sur le monde végétal réalisé par les biologistes et philosophes.

Végétation spéculative

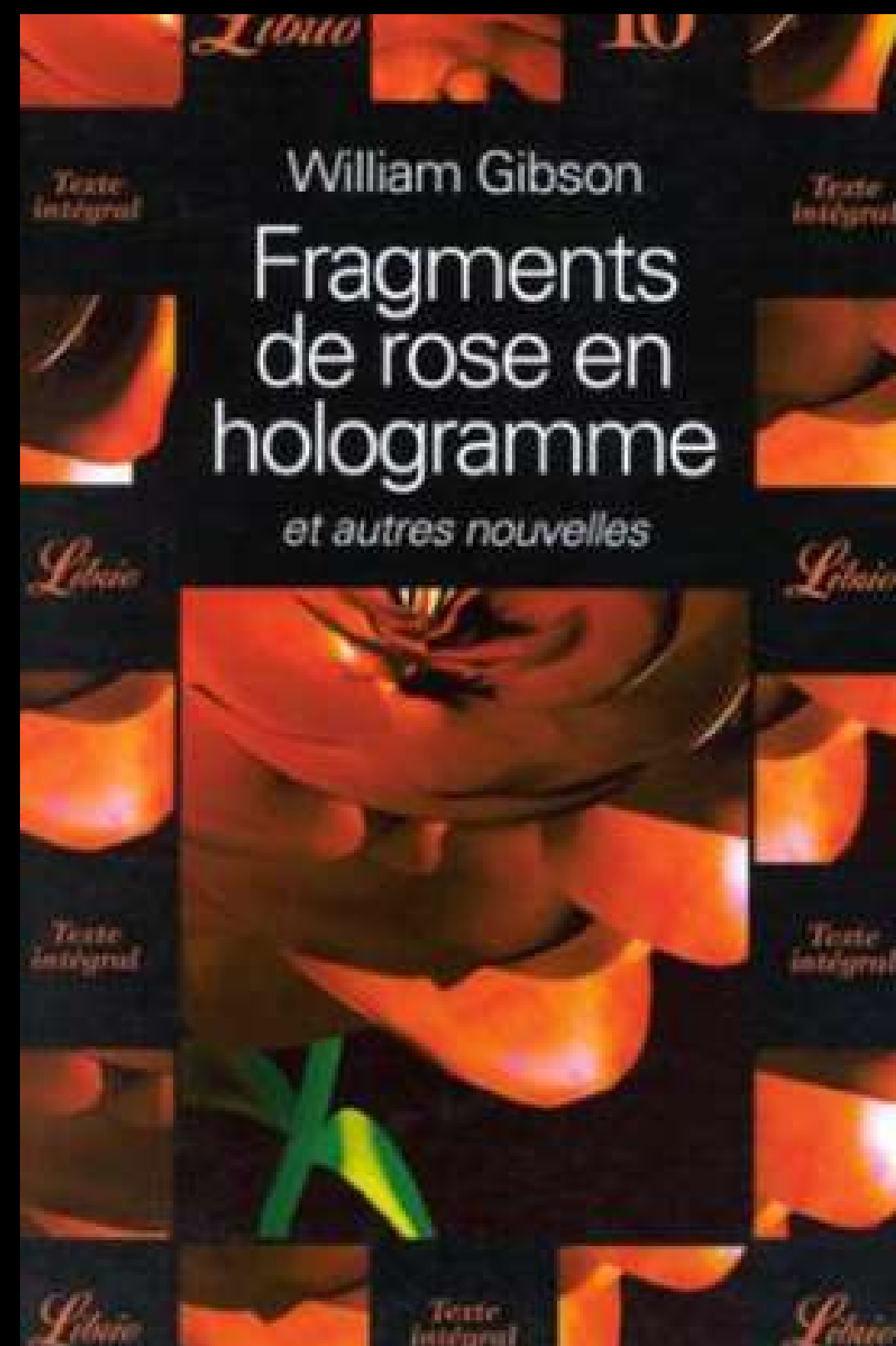
Afin de faciliter le tissage des liens entre l'espace urbain, le monde numérique et le monde végétal, nous avons fait une étude sur certaines œuvres de science-fiction où le monde végétal occupe un rôle fondamental dans l'imagination des villes futures, fantastiques, utopiques ou dystopiques.

Dans ces œuvres, les auteurs imaginent des nouveaux types d'espaces où se **rencontre l'humain et le végétal**, défient la division facile entre les mondes humain et non-humain et questionnent la **séparation taxonomique traditionnelle**. **Critiques de l'attitude anthropocentrique de nos sociétés et des aspirations transhumanistes des technophiles**, ils conçoivent par exemple :

- des « villes-fleurs » construites de **matière végétale** en tant que dernier espoir de civilisation dans un monde post-apocalyptique,
- des **systèmes de communication basés sur les pollens et phéromones**,
- des **arômes qui tordent l'espace-temps** et des nectars qui tissent des liens entre les villes lointaines et
- des maisons qui poussent à partir des grains comme les fleurs.



Recherches académiques sur le monde végétal dans la science-fiction: Plants in Science Fiction par l'Université de Chicago (2020) et Radical Botany par l'Université Fordham (2019).



Si les scénarios technophiles imaginent l'habitant de la ville du futur à travers la figure du cyborg qui est moitié humain moitié machine, dans ces divers scénarios de renaissance florale, l'habitant devient **une personne chimérique, moitié humain moitié plante**.

Ces œuvres littéraires représentent pour nous une source d'inspiration importante pour la conception de scénarios urbains puissants. Nous étudions également la représentation des milieux végétaux imaginaires dans les films de science-fiction pour y trouver des références visuelles.

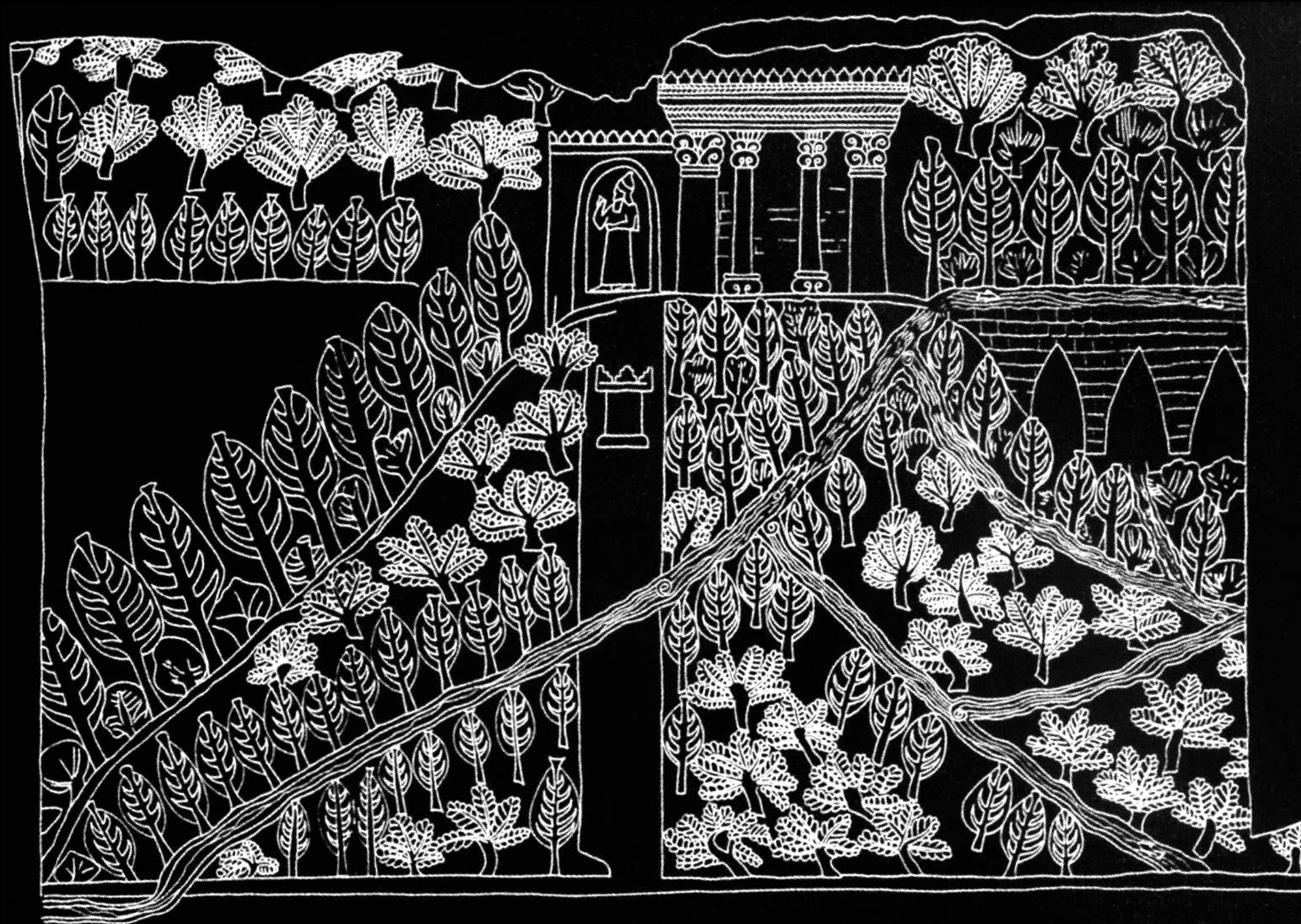
Villes-fleurs avec une infrastructure faite de pollens, de phéromones et d'abeilles mutants après la chute de technologies électroniques. Kathleen Ann Goonan, Queen City Jazz, 1994.



Les mystères de la troisième planète (1982) : jeux d'échelle et de couleurs similaires à ceux utilisés dans Avatar pour la conception des milieux végétaux fantastiques et extraterrestres.



Les villes végétales et la flore fantastique de la planète Pandora dans le film Avatar, 2009. Les plantes fluorescentes rappelant la photographie ultraviolette des fleurs et leurs proportions géantes créant des paysages fantastiques et étrangers.



Représentations néo-assyriennes des jardins sur les versants, des canaux, aqueducs et monuments. Dessins calqués sur des bas-reliefs des panneaux muraux, Ninive (Iraq), vers 7^{ème} siècle avant notre ère.

Jardins suspendus de Babylone

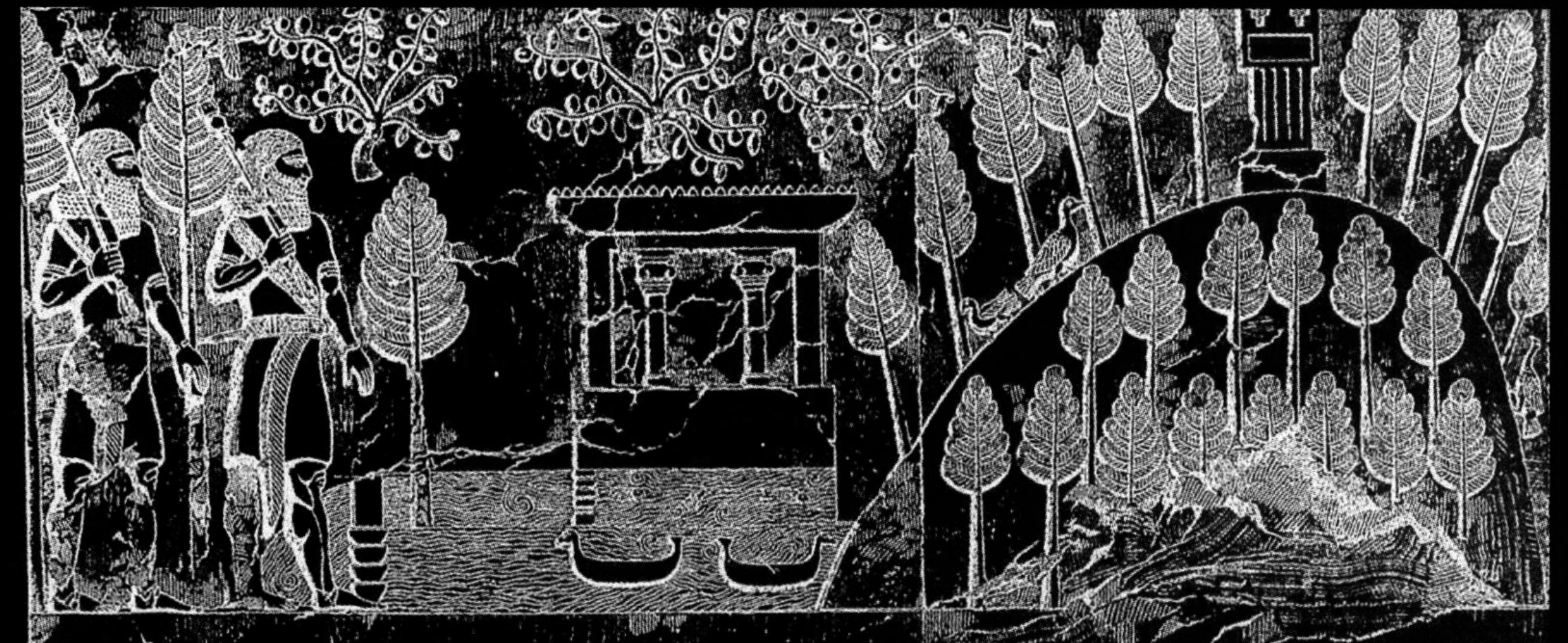
Les récits légendaires des « jardins suspendus de Babylone » représentent pour nous un **modèle historique, idéal et utopique** pour la conception expérimentale d'une fusion fantastique entre la ville contemporaine et la nature à l'ère de l'intelligence artificielle. Ces récits nous transmettent le **rêve intemporel que nos ancêtres vivant dans les premières villes du monde avaient pour fusionner la ville avec la nature**. Ils cristallisent également une tradition remarquable de l'une des plus anciennes cultures urbaines : celle de vouloir **transformer la ville en une sorte de paysage naturel** à travers la construction des grands édifices à terrasses imitant les montagnes couvertes des jardins et fleurs variés.

Ces jardins matérialisent un **double symbolisme urbain, nostalgique et prospectif**. D'un côté, ils représentent la trace de notre habitat initial, celui dans lequel l'homme était chasseur-cueilleur : la nature elle-même. Cette époque, où nous avons eu un rapport plus directe, intime et quasi-naïf avec la nature, qui pour certains a donné naissance aux mythes de Jardin d'Éden, aux exemples de jardins persans et aux imaginaires floraux du Paradis.

De l'autre côté, ces jardins représentent la capacité technologique de la société urbaine à donner forme à ses milieux naturels et culturels en matérialisant ses rêveries urbaines. D'après les récits historiques, c'est l'ingéniosité des technologies constructives et hydrauliques des Babyloniens qui rend possible la construction d'un tel projet ambitieux. Des complexes systèmes d'irrigation, vis d'Archimède géantes pour faire monter l'eau aux jardins se trouvant plus haut que le sol, nombreux canaux et aqueducs, ainsi que des technologies de construction comme la brique cuite... Les Babyloniens concrétisent ainsi le **rêve d'une ville-jardin** grâce aux possibilités constructives et urbaines que leurs technologies ingénieuses leur offraient.

Ces récits nous donnent un modèle de conception où s'entrelacent **la technologie, la nature et la ville**. Nous souhaitons **recycler ce rêve antique à travers nos outils numériques** contemporains. Remplacer les réseaux hydrauliques des Babyloniens avec nos réseaux Wifi, algorithmes et pixels pour ressusciter une vision urbaine holistique, pour concevoir un nouveau type d'espace où s'entremêlent le réel et le virtuel, la nature et la culture, l'humain et le végétal.

Repenser les jardins suspendus de Babylone à l'ère de l'intelligence artificielle, l'adapter aux villes contemporaines et tisser un réseau planétaire de jardins suspendus.



Représentations néo-assyriennes des jardins sur les versants, des canaux, aqueducs et monuments. Dessins calqués sur des bas-reliefs des panneaux muraux, Ninive (Iraq), vers 7^{ème} siècle avant notre ère.

Dans les yeux d'une abeille

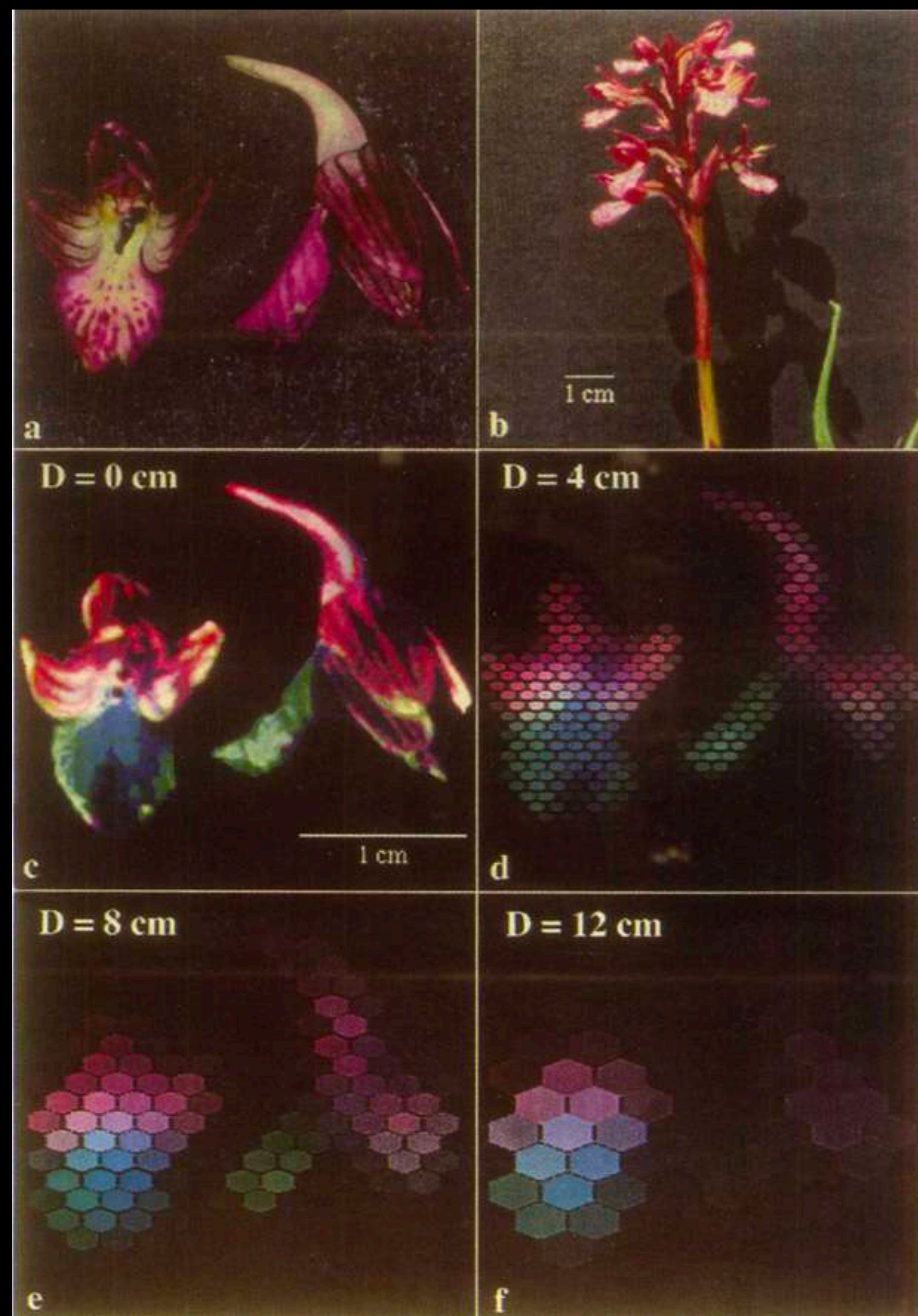
Référence artistique : une expérience immersive en ligne conçue par Marshmallow Laser Feast à partir de la numérisation d'un environnement forestier dans le cadre de leur projet « In the Eyes of The Animal » en 2015. Le projet principal était une expérience en réalité virtuelle qu'on pourrait faire dans une forêt en Angleterre. Un casque de VR permettait de voir la même forêt à travers les yeux des animaux divers. La plateforme en ligne et le film d'animation publié sur YouTube leur ont permis de mieux communiquer leur projet et de l'éterniser.





Images d'un bouquet de fleurs, dans le spectre visible par l'œil humain, capturées par un dispositif mécano-optique correspondant étroitement à la résolution de la vision spatiale des abeilles. La première image montre un segment de l'image qui pourrait facilement être confondu avec plusieurs parties d'une scène, tandis que la deuxième image montre comment une vue holistique révèle la véritable forme et la structure des fleurs. La troisième image montre un achèvement et un processus potentiels de l'image dans le cerveau. Alors que les humains traitent facilement la Gestalt d'une scène, on supposait que les insectes comme les abeilles ne pouvaient utiliser que des informations élémentaires. De nouveaux travaux montrent désormais que les abeilles préfèrent en réalité le traitement de type global, mais peuvent également prêter attention aux éléments locaux au sein d'une scène complexe.

A.G. Dyer et S.K. Williams, « Mechano-optical lens array to simulate insect vision photographically », *Imaging Science Journal*, vol.53, 2005, p.209-213.



Images hypothétiques d'une fleur d'orchidée vue par une abeille. (a) photo d'une seule fleur et (b) une inflorescence d'*Orchis caspia*. Les images reconstruites (c,d,e,f) montrent les captures quantiques des trois types de récepteurs d'une abeille en fausses couleurs. (c) correspond à la résolution de la caméra ; (d, e, f) montrent la fleur telle qu'elle se projette sur le réseau d'Ommatidies à des distances de 4, 8 et 12 cm, respectivement. Les ommatidies sont indiquées sous forme d'hexagones. Parce que l'œil de l'abeille est de forme ovale (Stavenga, 1979 ; Land, 1997), la projection de la fleur sur les ommatidies ! Le tableau donne une image de fleur déformée et allongée. Par souci de clarté et pour montrer l'image de la fleur sans distorsions, nous avons projeté le réseau hexagonal d'ommatidies sur le plan et compressé dans ce but les hexagones dans la direction verticale.

De Vorobyev et al., Institut für Neurobiologie, Freie Universität Berlin, 1997

Macro-photographie ultraviolette

L'un de nos objectifs durant la phase de numérisation est de révéler les couleurs et les formes des mondes fantastiques qui se juxtaposent au nôtre et cohabitent notre planète. On pourrait ainsi voir le monde à travers les yeux d'une fourmi curieuse qui grimpe sur le pédoncule d'un jasmin ou ceux d'une abeille qui place dans sa corbeille les pollens qu'elle récupère des étamines d'un hibiscus. Un pétale bleu qui nous paraît plutôt plat pourrait ainsi se transformer en un paysage vallonné et une topographie extraterrestre tachée de centaines de nuances de bleu.

À cette fin, nous allons combiner les méthodes de la macrophotographie et la photographie ultraviolette pour créer des environnements 3D qui simulent les milieux sensoriels des insectes. Il n'existe aujourd'hui aucun exemple de numérisation 3D qui combine ces deux méthodes.



Une alstromère blanche
sous la lumière ultraviolette



La macrophotographie permet, à l'aide d'un objectif macro, de faire un **changement d'échelle**, de s'approcher au **point de vue de l'insecte** et de rentrer dans un nouveau rapport proportionnel avec le monde végétal comme celui d'une abeille. Nous pouvons ainsi révéler de nombreuses qualités physiques du monde floral qui échappent habituellement au regard humain. Des textures, motifs, reliefs et dégradés de couleurs qui auparavant restaient invisibles pour nos yeux dessinent une architecture florale et des paysages organiques à la fois familiers et étrangers qui semblent émerger d'un monde fantastique et extraterrestre.

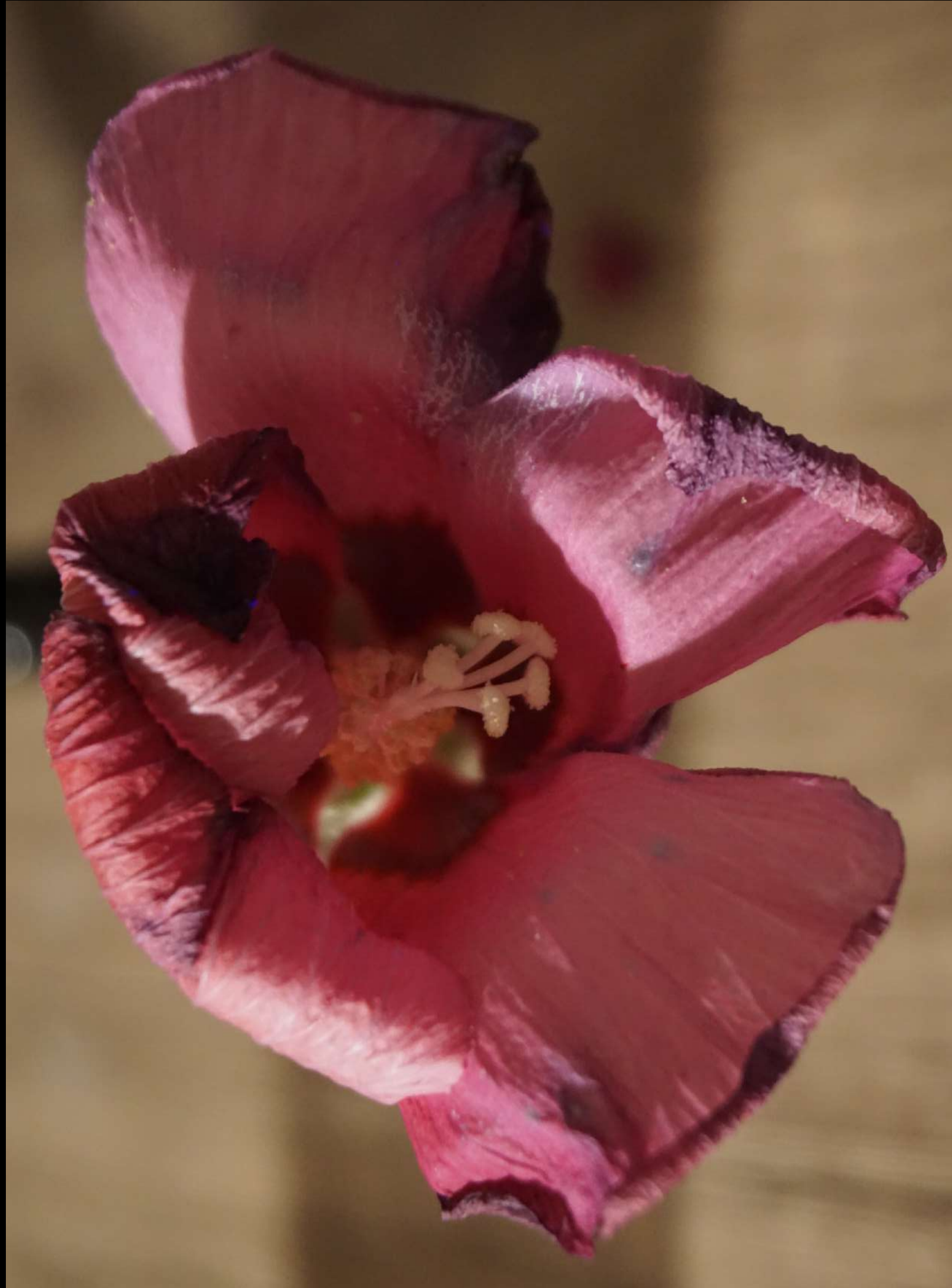
Quant à la photographie ultraviolette, elle permet, à l'aide d'une lampe à rayons ultraviolets, d'augmenter la capacité perceptuelle de l'œil humain et de voir les couleurs qui restent en dehors du spectre visible. À l'encontre de la vision humaine, la quasi-totalité des insectes sont capables de percevoir la lumière ultraviolette qui leur permet d'identifier facilement la quantité du nectar et des pollens sur chaque fleur dans un champ. **Le nectar obtient une apparence fluorescente sous la radiation ultraviolette.** Il dessine sur les pétales des motifs qui restent invisibles à l'œil humain et apparaît comme autant de pistes d'atterrissage lumineuses aux insectes pollinisateurs.



Une alstromère blanche
sous la lumière blanche



Une alstromère blanche
sous la lumière ultraviolette
et ses pollens fluorescents



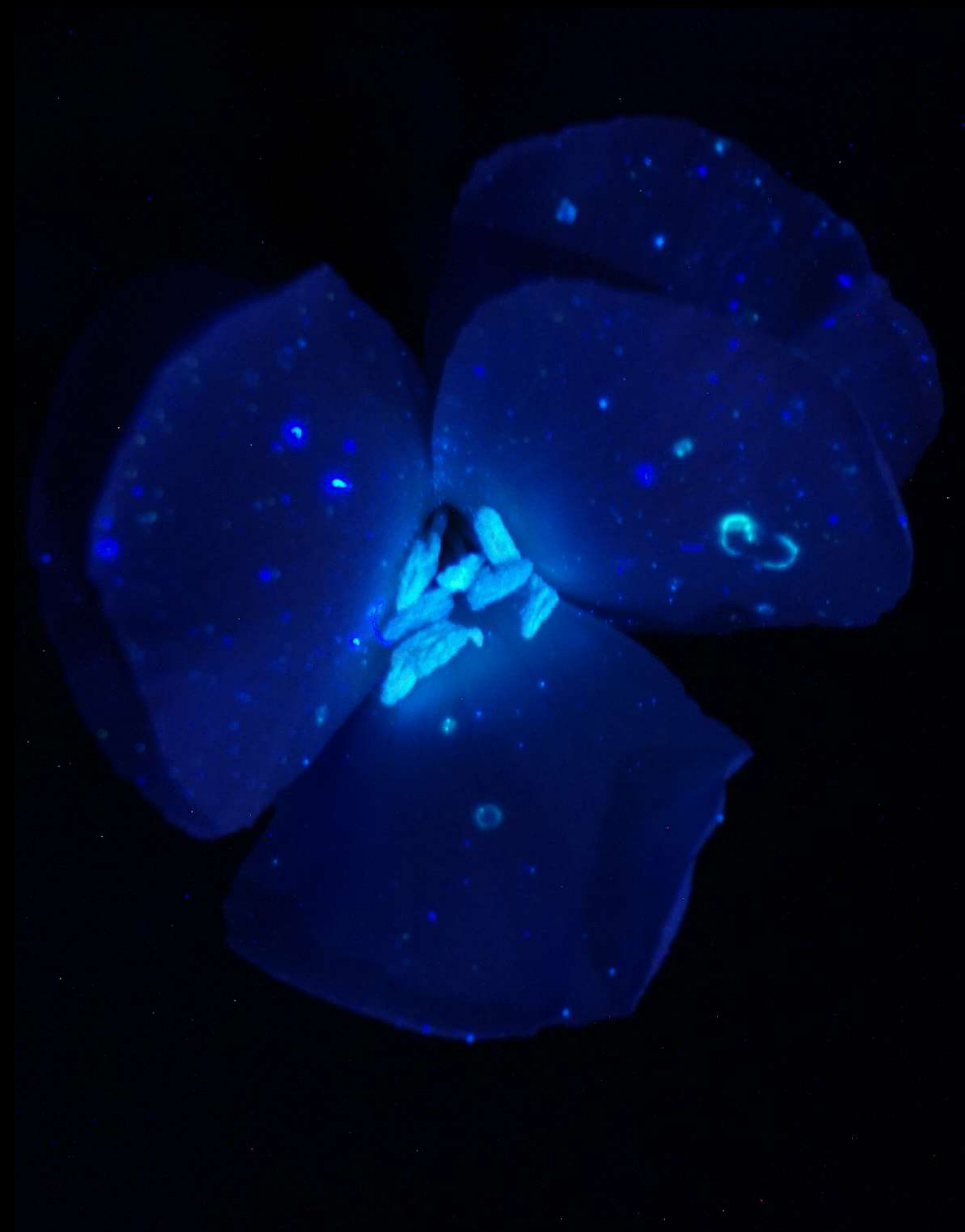
Un althéa rose
sous la lumière blanche



Un althéa rose
sous la lumière ultraviolette
et ses pollens fluorescents

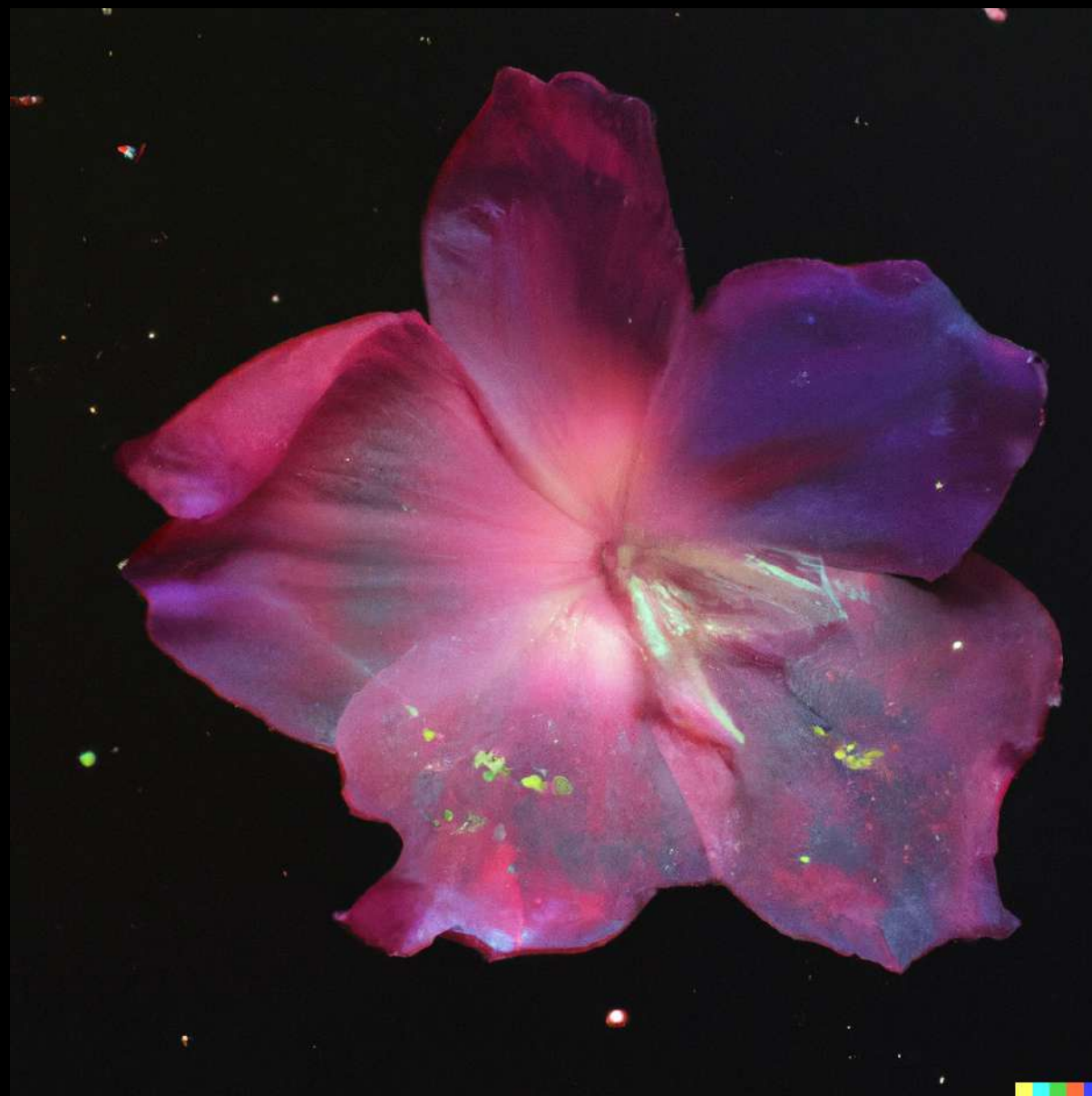


Un géranium blanc
sous la lumière blanche



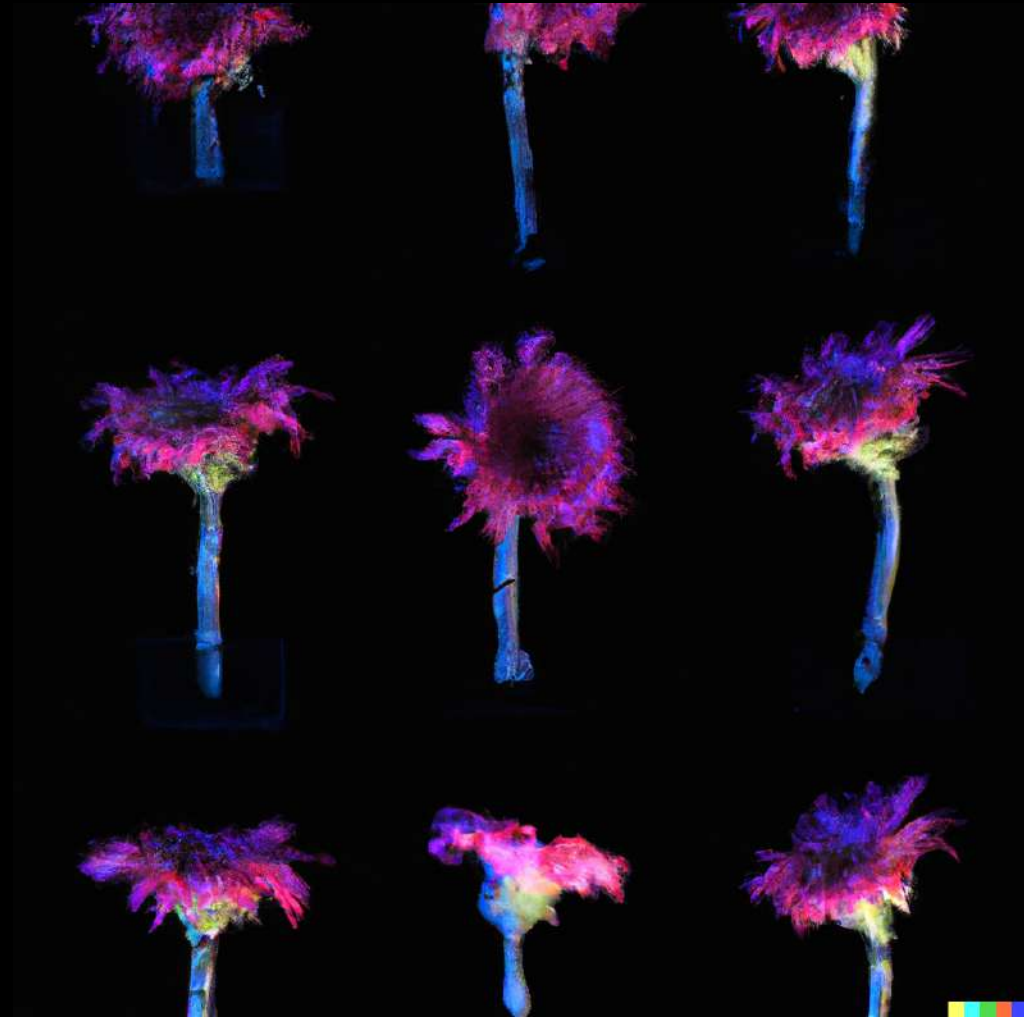
Un géranium blanc
sous la lumière ultraviolette
et ses pollens fluorescents

Réinterprétations par l'IA

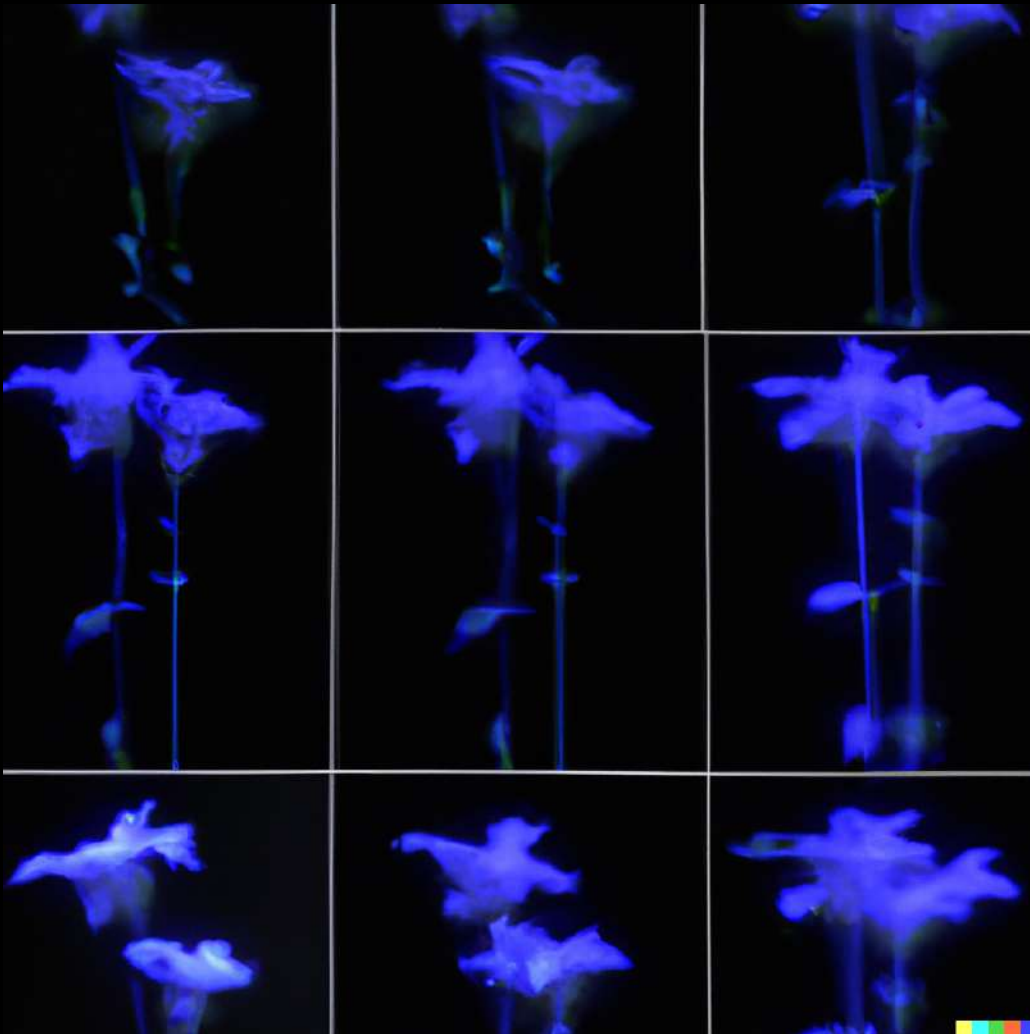




pink flower in uv light, same flower from different angles, 32 grids, photogrammetric



pink flower in uv light, same flower from different angles, 32 grids, photogrammetric



flower in uv light, from different angles, 16 grid



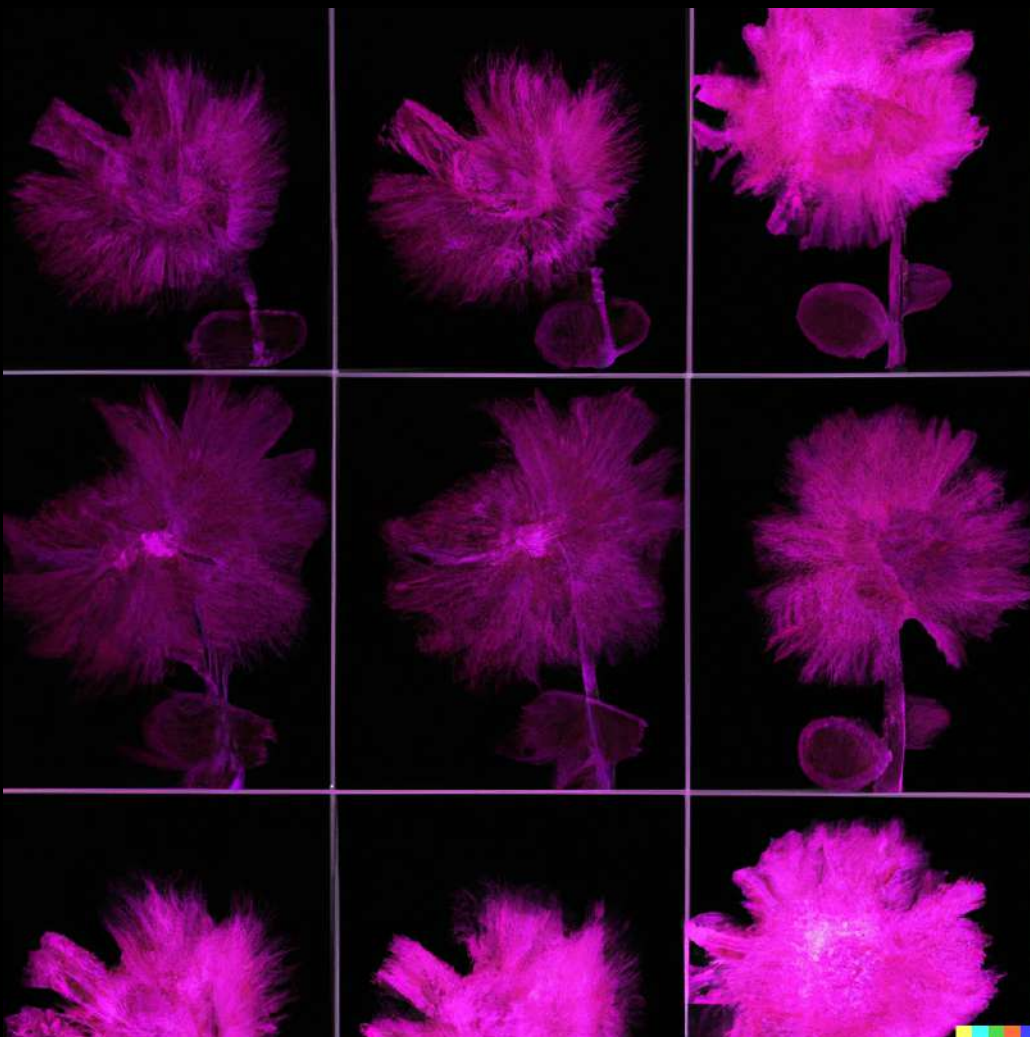
flower in uv light, from different angles, 16 grid



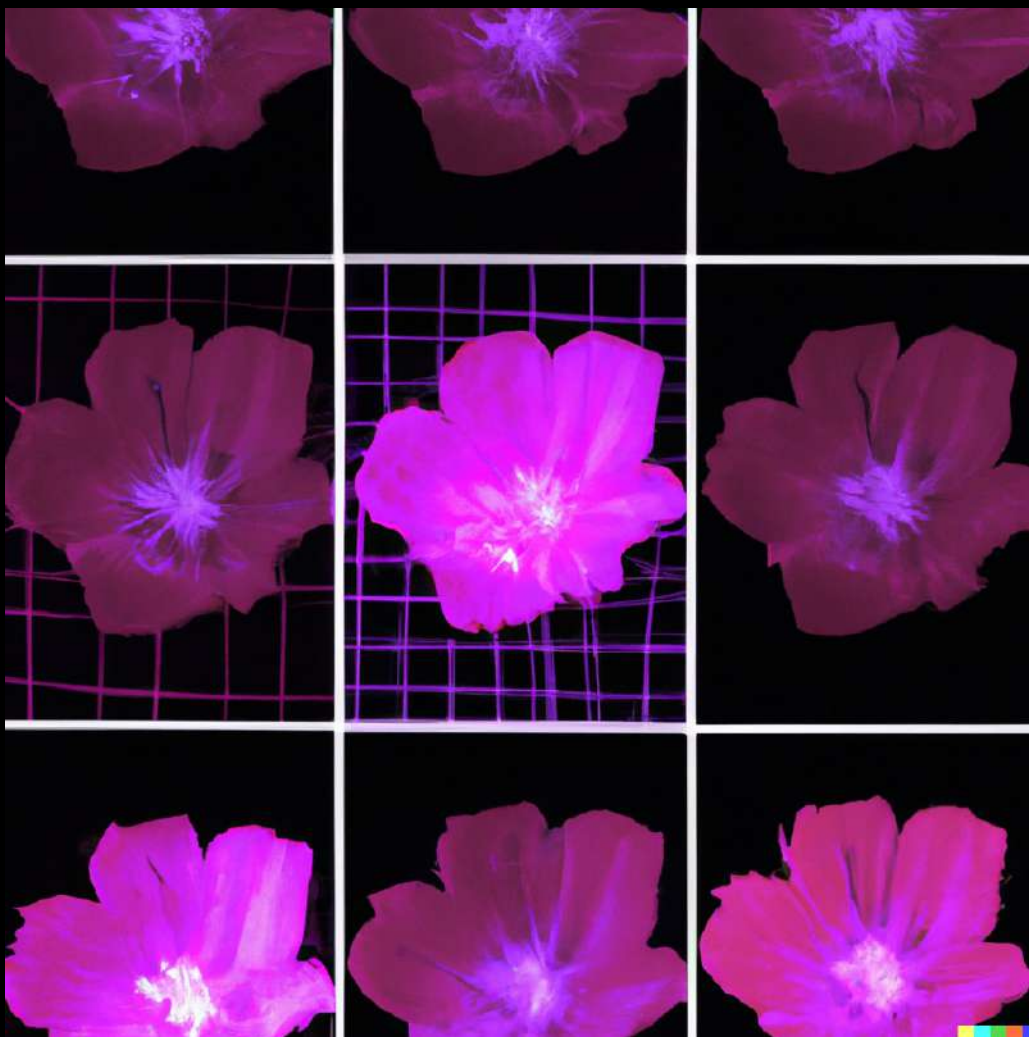
pink flower in uv light, same flower from different angles, 32 grids



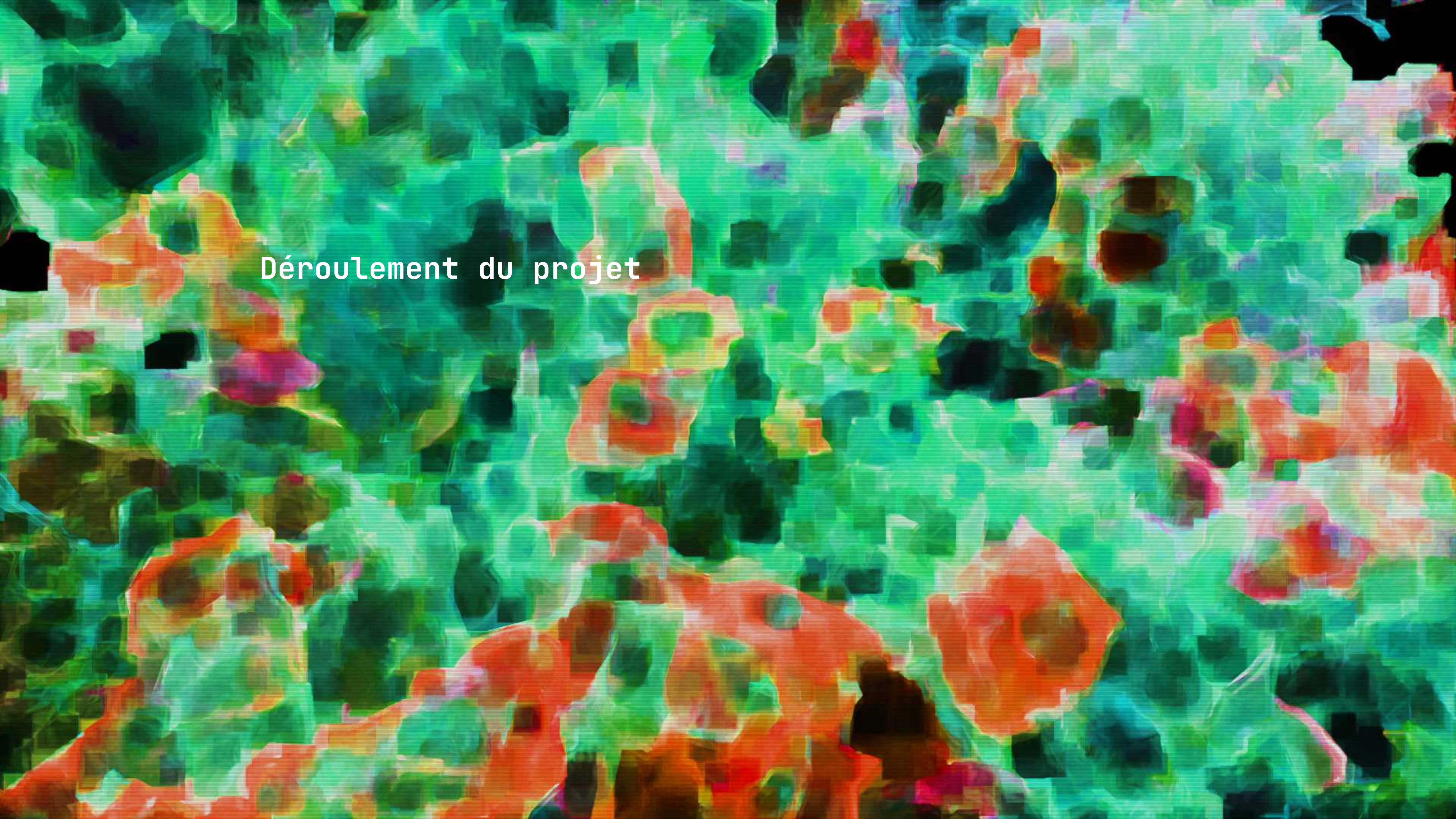
pink very realistic 4k flower in uv light, same flower from different angles, 32 grids, photogrammetric angles



pink flower in uv light, same flower from different



pink flower in uv light, same flower from different angles, in grids

The background is a dense, abstract composition of overlapping brushstrokes. The color palette is dominated by various shades of green, ranging from dark forest green to bright, almost neon lime green. Interspersed among the green are strokes of warm orange, terracotta, and soft pink. The texture is highly visible, with thick, impasto-like applications of paint creating a sense of depth and movement. The overall effect is vibrant and organic, resembling a close-up of a colorful, textured surface like a piece of fabric or a natural material.

Déroulement du projet

Deux missions de numérisation

Nous avons fait deux missions de numérisation 3D dans les jardins du château ; la première en juillet et la deuxième en septembre 2022. À part ces missions, nous avons fait des numérisations spontanées autour de Paris suivant les besoins qui ont émergé le long du projet.

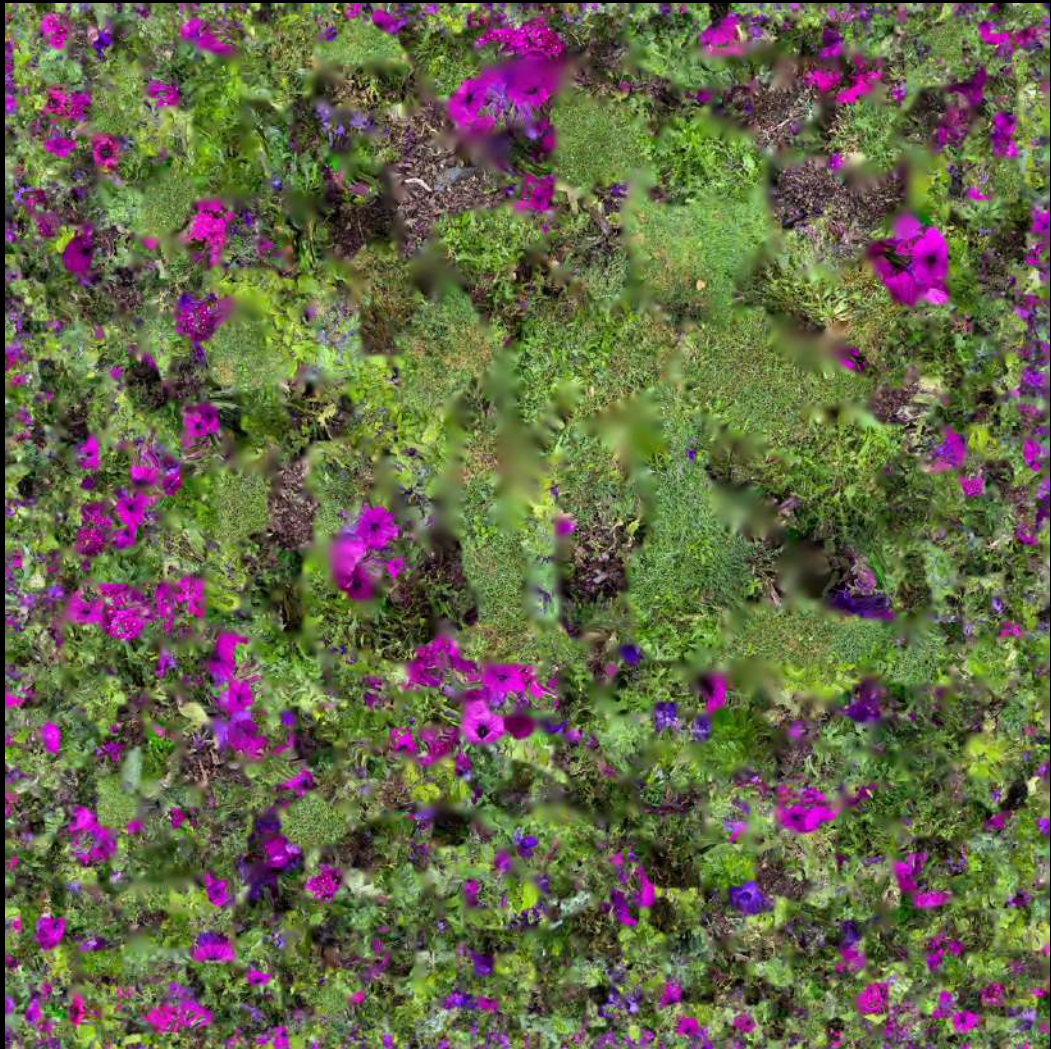
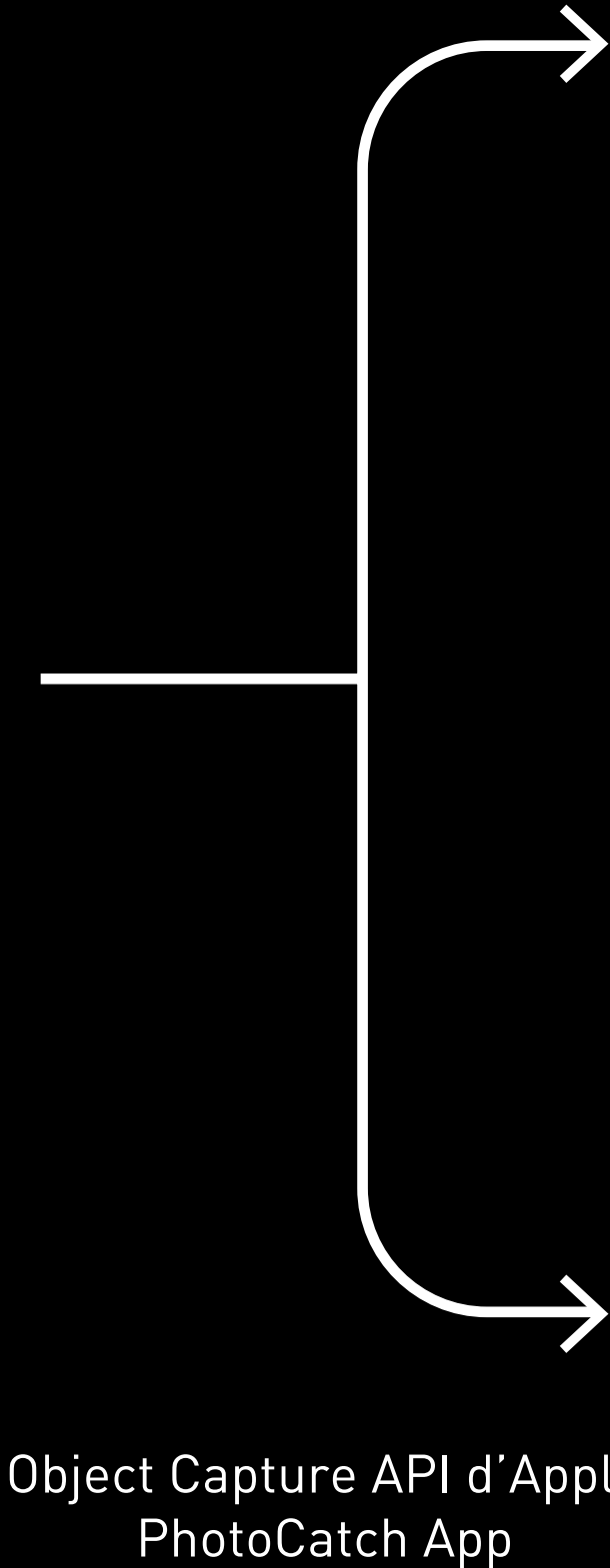
Pendant la première mission, nous avons pu numériser des jardins qui avaient plus de fleurs qu'en septembre. Mais la difficulté principale que nous avons rencontrée était la chaleur. La prise de plusieurs dizaines de milliers de photos sous une température élevée a rendu plusieurs fois nos appareils dysfonctionnels. Dans le domaine de Chaumont-sur-Loire, nous avons fait environ 50 numérisations au total.

Nous avons utilisé le logiciel PhotoCatch (algorithmes d'Apple) pour générer des modèles 3D à partir des photos que nous avons prises.



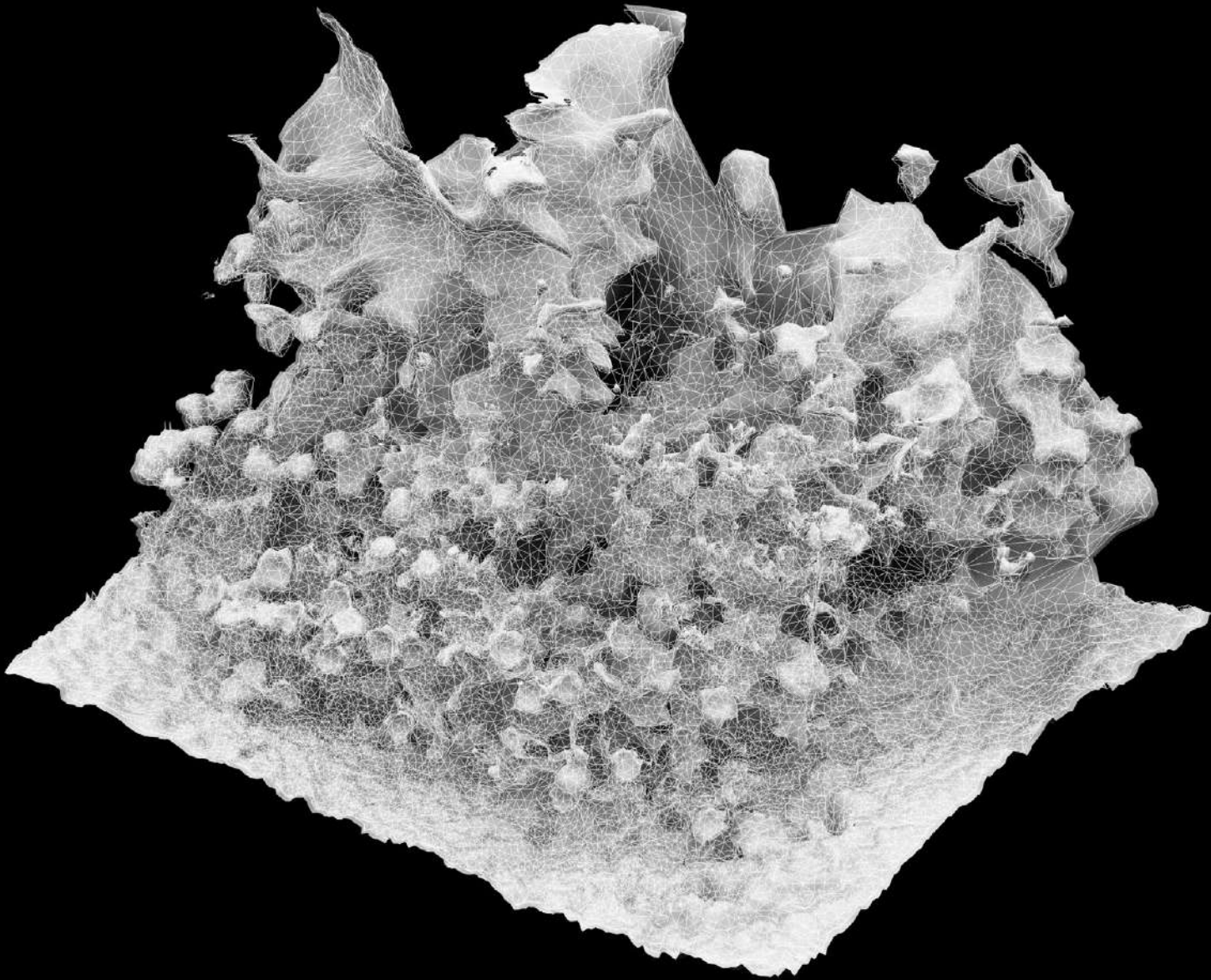


172 photos
3024 x 4032 pixels
iPhone 11
675,2 MB



Couleurs

Albedo Texture
4096 x 4096 pixels
Png format



Formes

Mesh geometry
65,373 polygons
Obj format

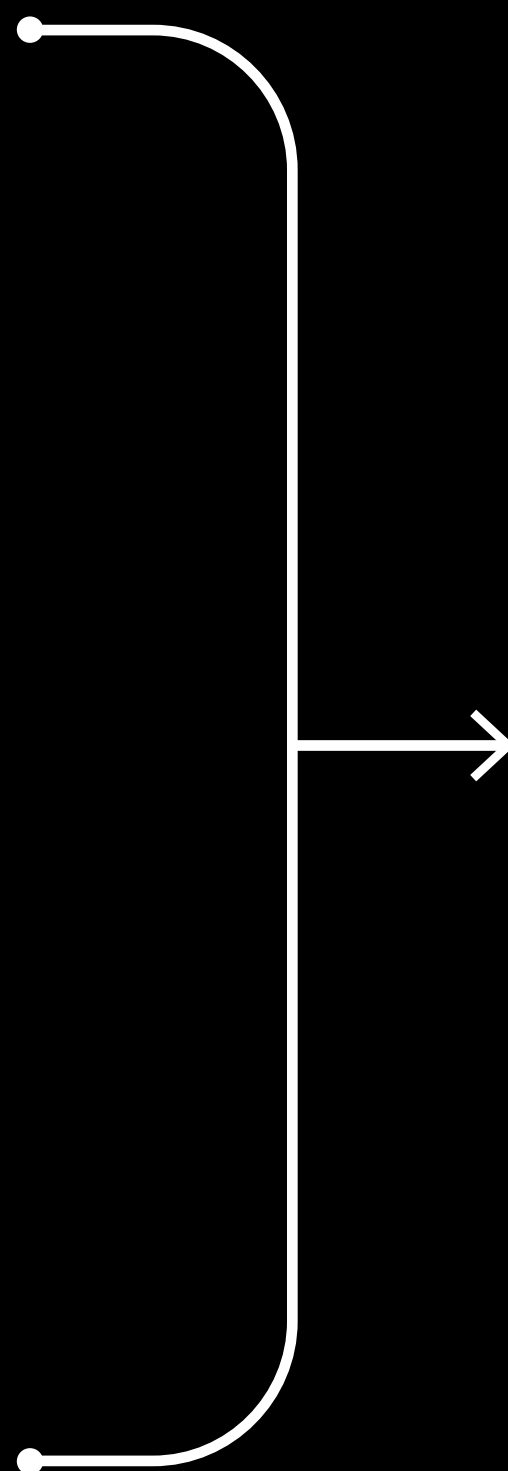
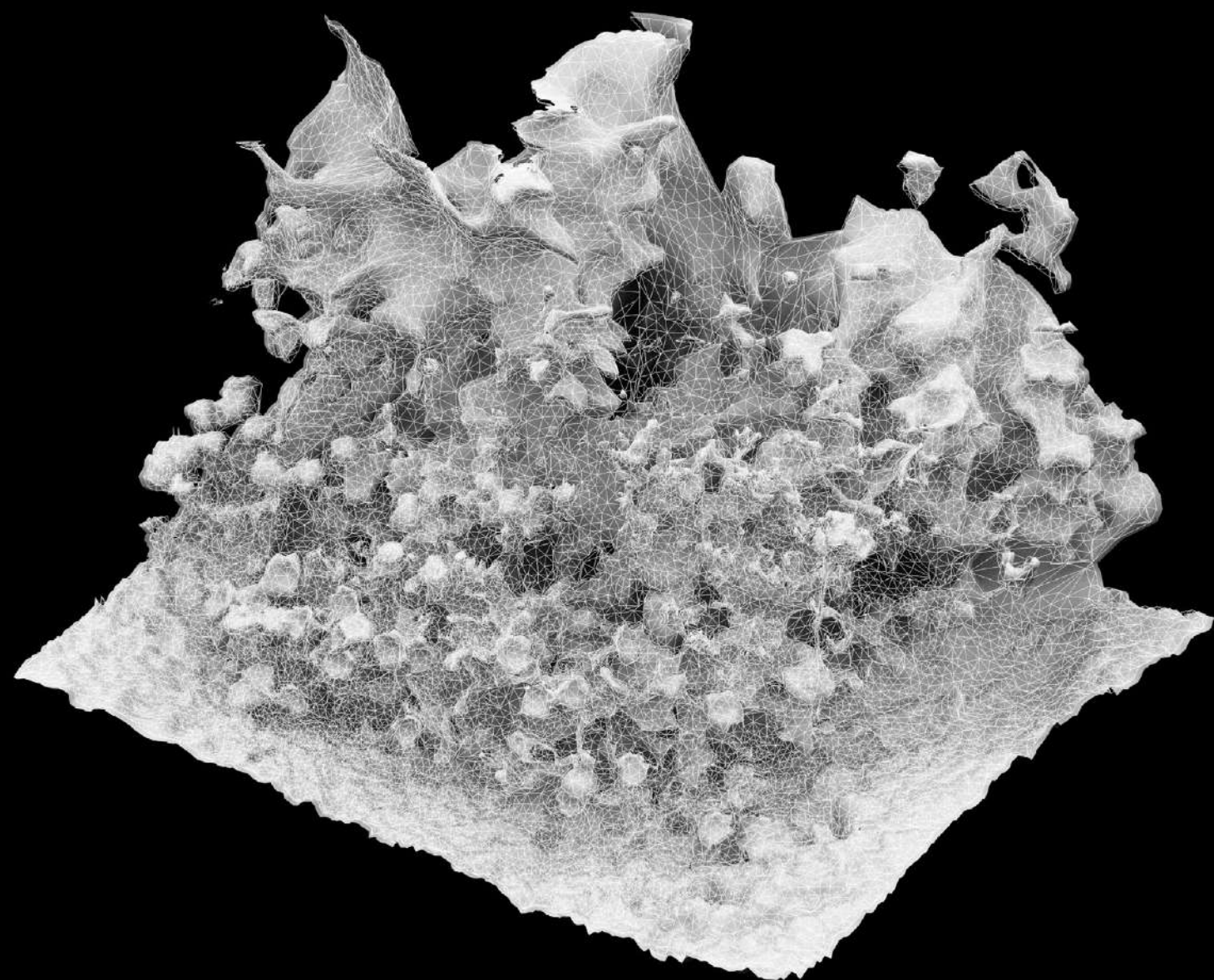
Couleurs

Albedo Texture
4096 x 4096 pixels
Png format



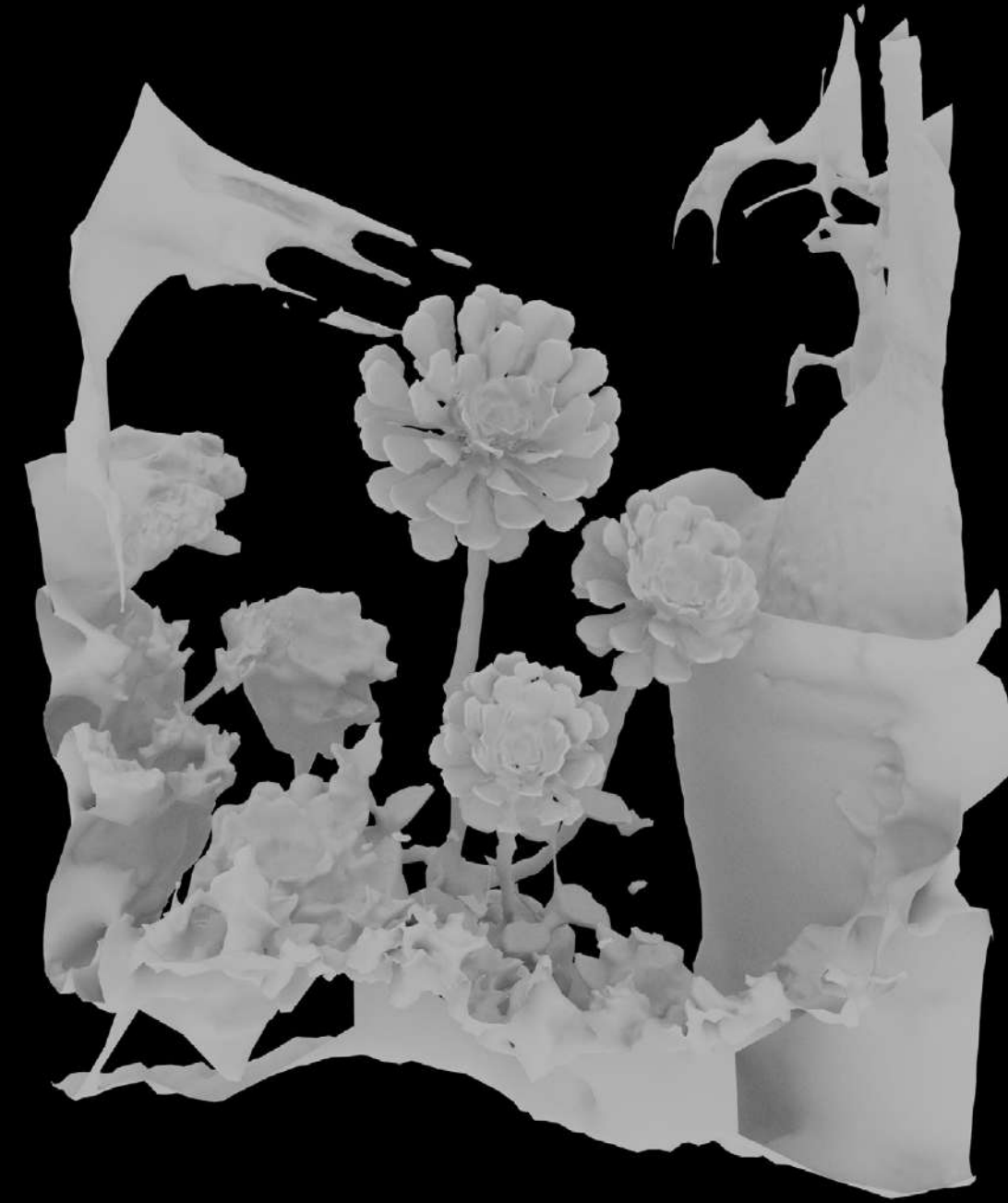
Formes

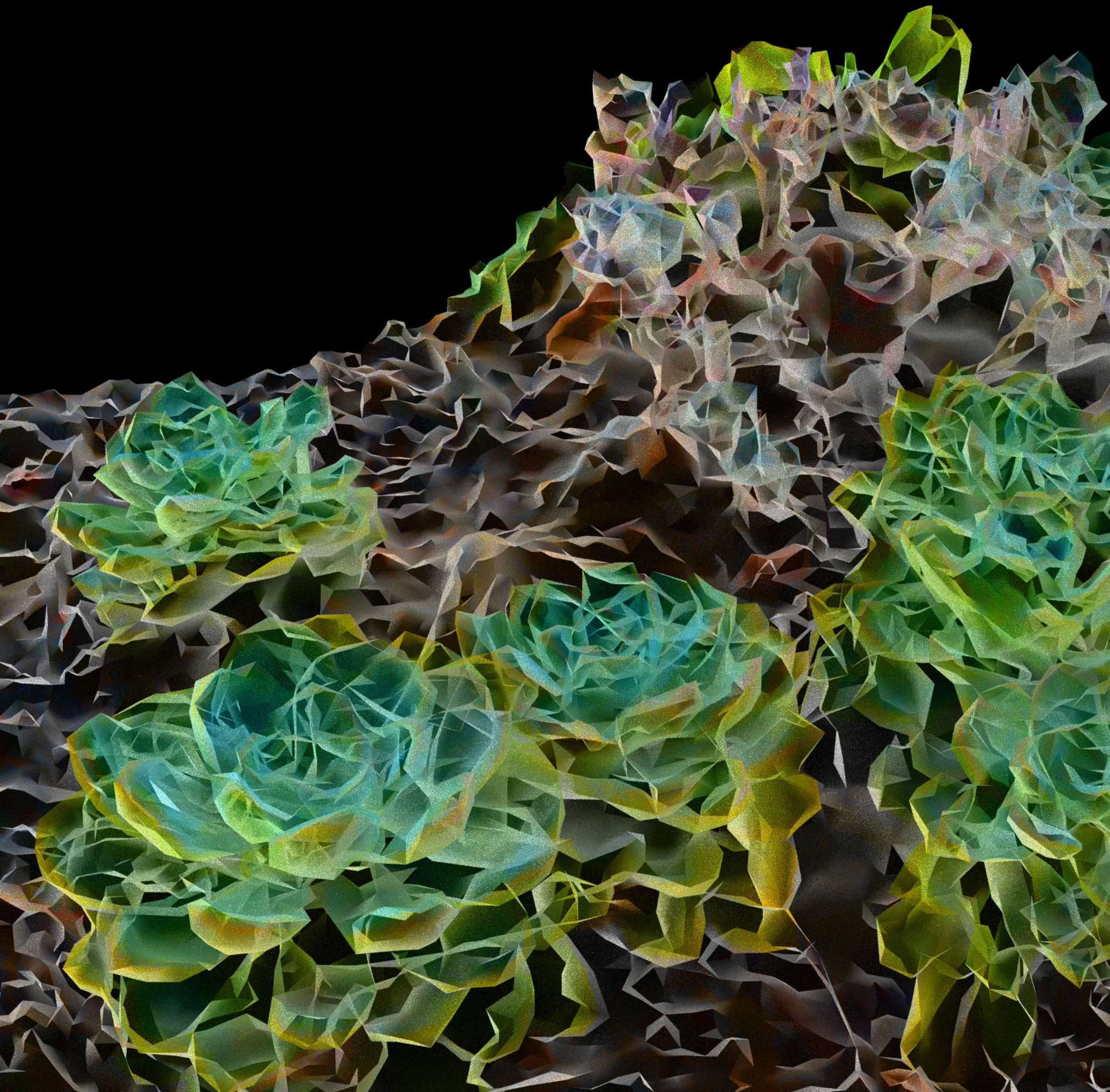
Mesh geometry
65,373 polygons
Obj format





Chaque image est une fleur. Elles sont générées par les algorithmes de la photogrammétrie qui traduisent l'image 2D en un modèle 3D.





Optimisation des modèles 3D

Les modèles générés par la numérisation photogrammétrique sont retouchés et nettoyés pour qu'ils se présentent comme des **blocs de réalité découpés** pour en faire un **clone virtuel**. Nous également optimisé leurs géométries et textures par des algorithmes de compression pour faciliter leur visualisation dans la réalité augmentée.

Classification botanique

L'étape suivante a été la création d'un catalogue des jardins numérisés en fonction de leurs échelles et de la classification botanique des fleurs qu'ils contiennent.

Nous avons ainsi identifié des traits partagés entre ces différents jardins et nous les avons groupés en fonctions de familles botaniques :

1. Astéracée
2. Herbacées
3. Éricales
4. Succulent
5. Inflorescence



Astéracée



Dahlia Pinnata
29 s001, tugce06



Dahlia Pinnata
31 s008, tugce07



Dahlia Pinnata
14 s013



Dahlia Pinnata
18 s013



Coronidium elatuma
19 s005



Xerochrysum bracteatum
12 s017



Cosmos bipinnatus
12 s017



Echinacea purpurea`
21 tugce005

Communément appelé famille des asters, des marguerites, des composites ou des tournesols. La plupart des espèces d'Asteraceae sont des plantes herbacées annuelles, bisannuelles ou vivaces. La principale caractéristique commune est l'existence parfois de minuscules fleurons individuels qui sont maintenus ensemble par des involucre protecteurs dans des capitules. La famille a une répartition très répandue, on la trouve sur tous les continents sauf l'Antarctique.

Inflorescence



Dianthus barbatus
10 s015



Buddleja davidii
10 s015



Hydrangea macrophylla
30 s021



Cleome hassleriana
22 s014



Persicaria longiseta
13 s012



Penstemon hartwegii
16 tugce008

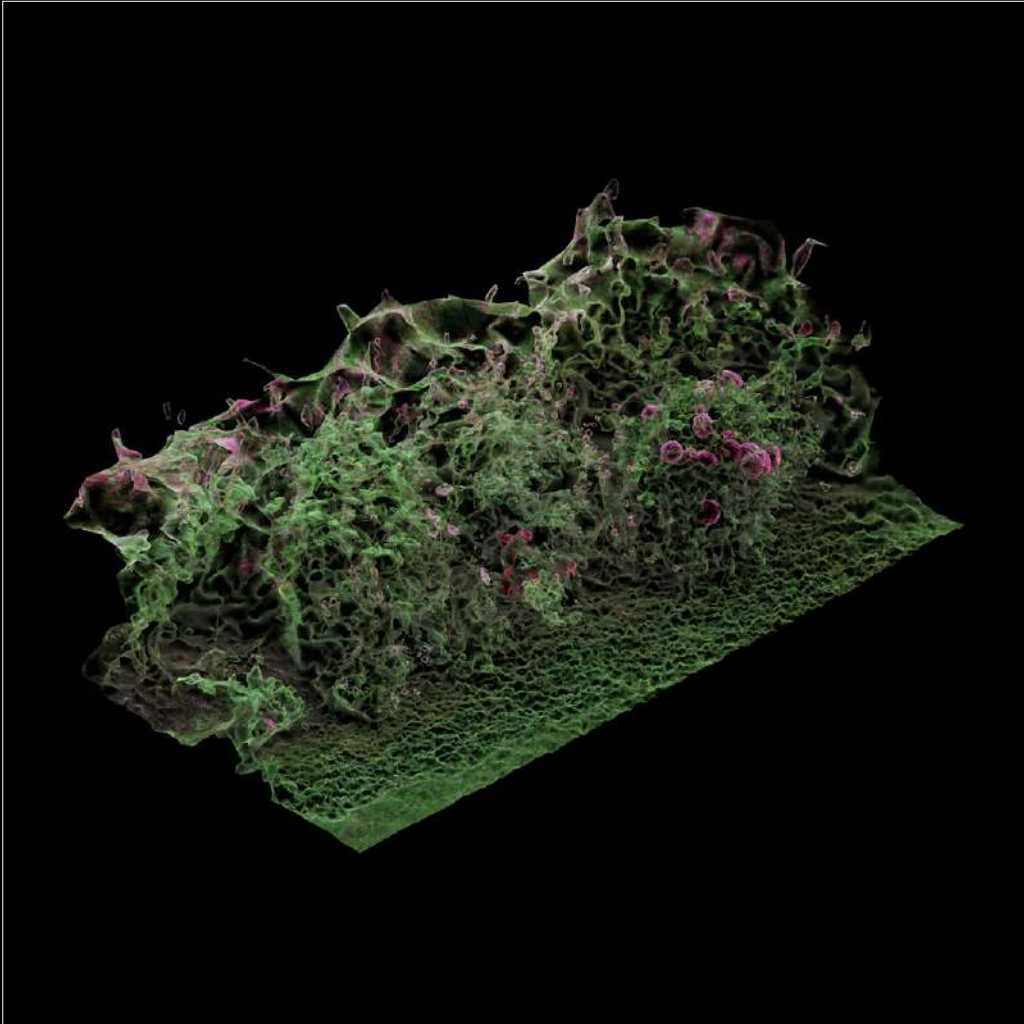


Scaevola aemula
10 s015



Salvia guaranitica
09 s001

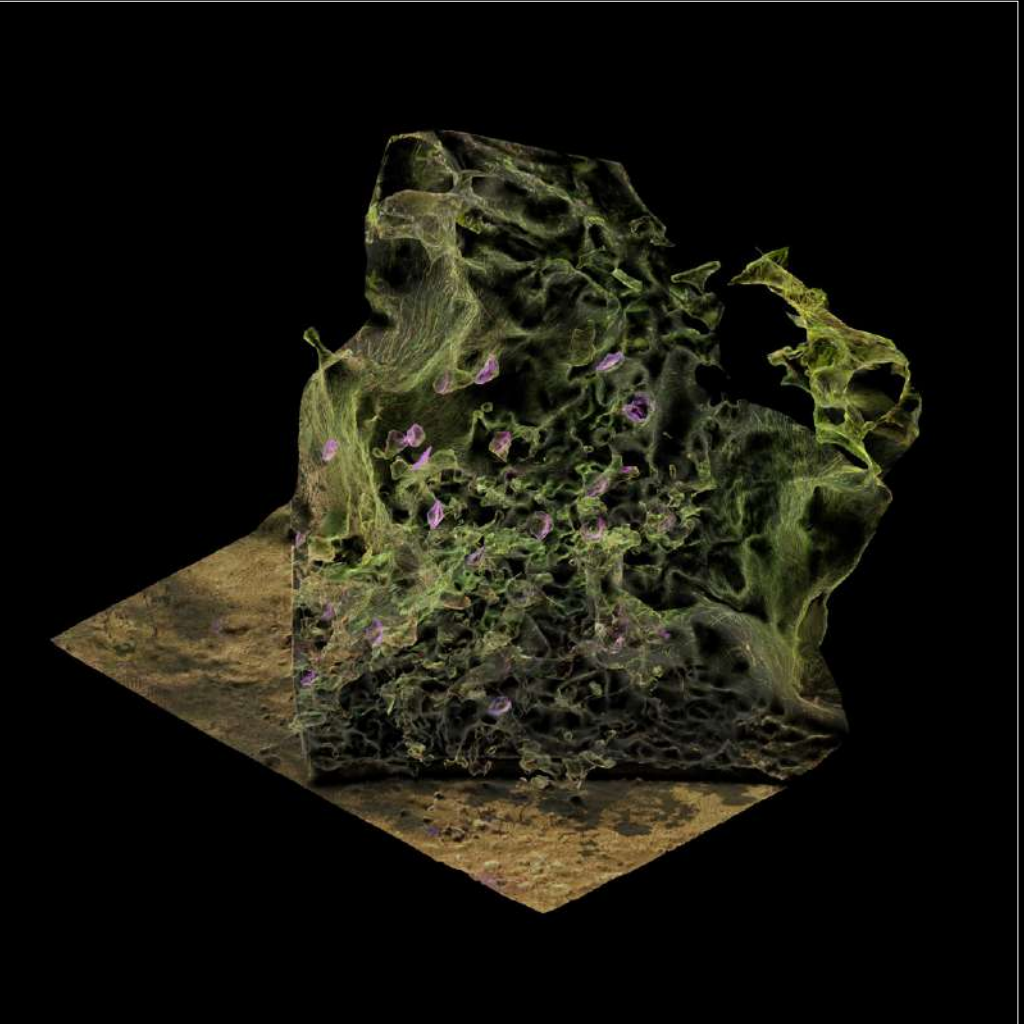
Groupe ou grappe de fleurs disposées sur une tige composée d'une branche principale ou d'un arrangement compliqué de branches. Les fleurs de l'inflorescence poussent selon des schémas de reproduction spécifiques qui leur permettent de se développer latéralement ou médialement. Leurs bractées attirent les pollinisateurs et protègent les jeunes fleurs.



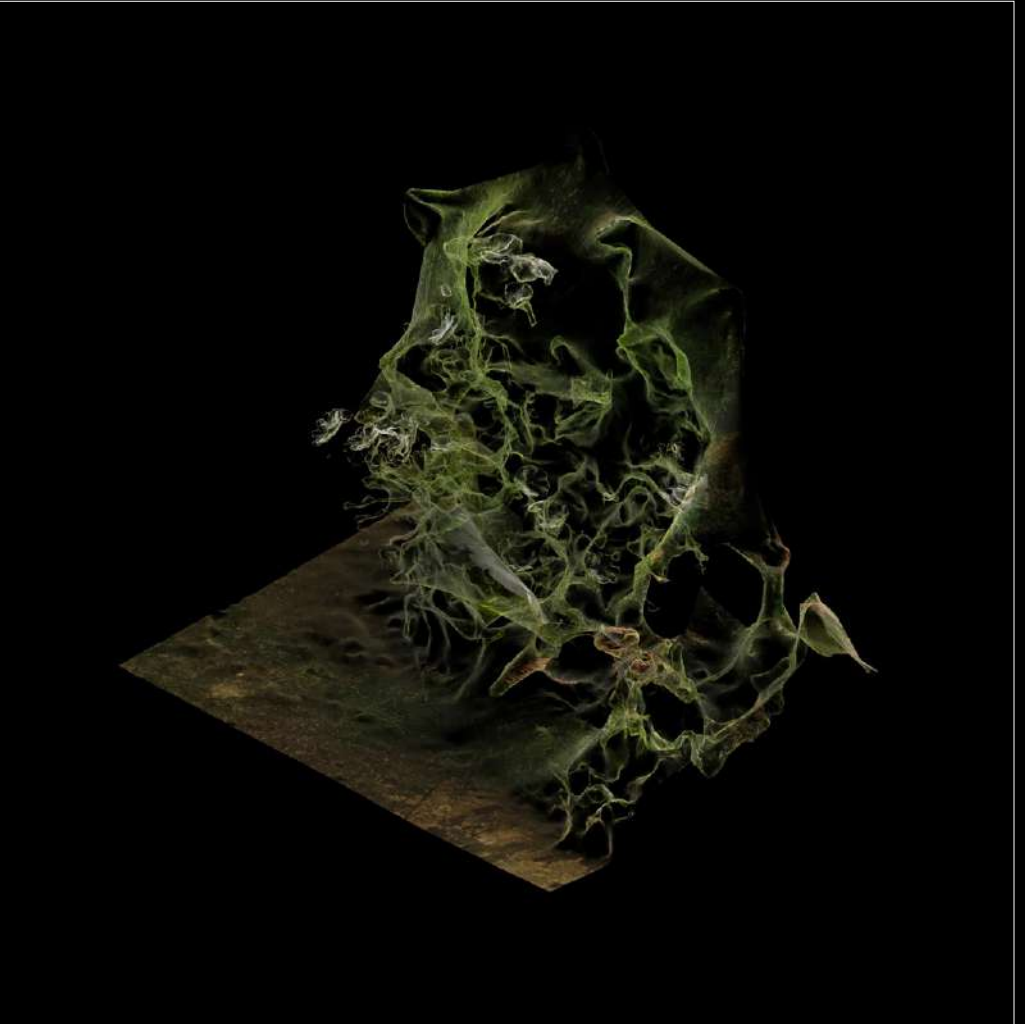
Dahlia Pinnata
Historical Park
Domaine De Chaumont-Sur-Loire
No.s.01
12/09/2022



Sempervivum arachnoideum
The Living Batik
No.s.03
12/09/2022



Geranium Oreganum
Unknown
No.s.04
12/09/2022



Cosmos bipinnatus
Unknown
No.s.05
12/09/2022



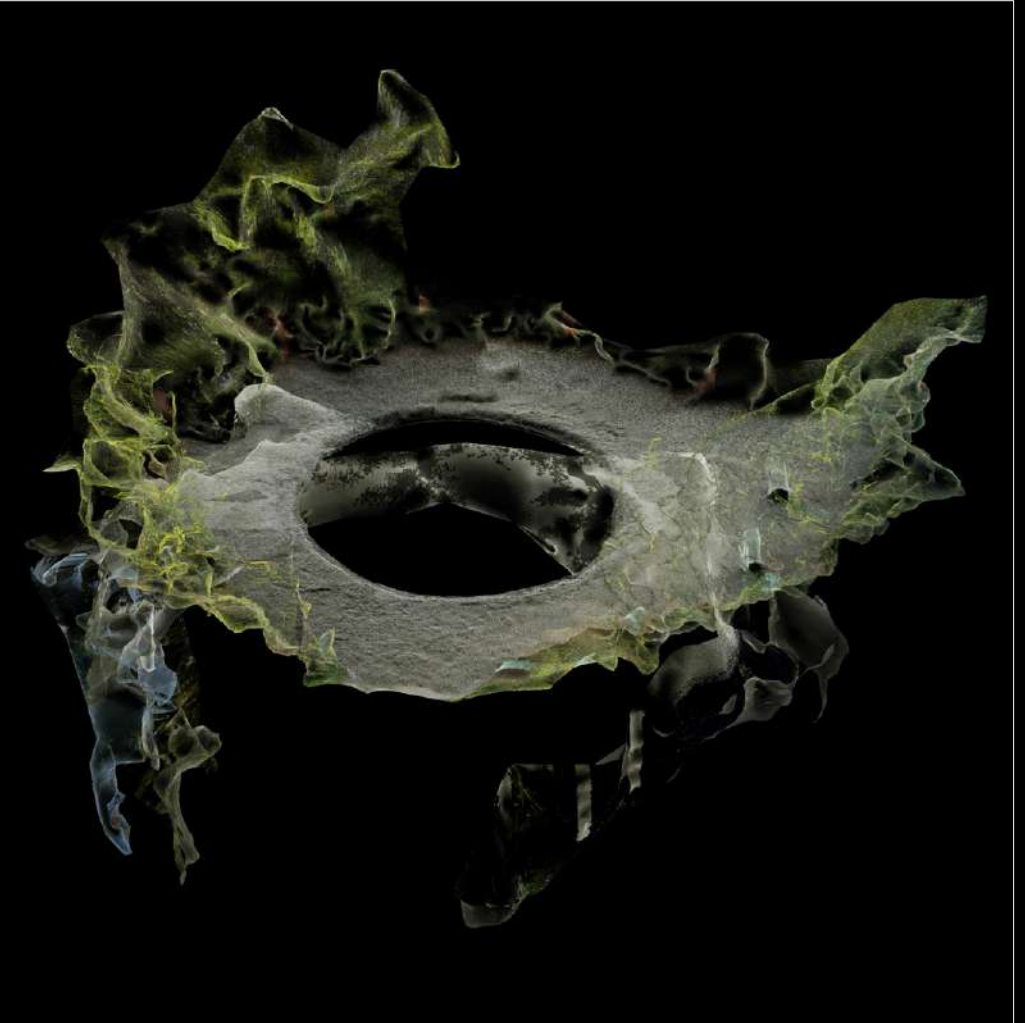
Echeveria elegans
La Serre Extraordinaire
No.s.06
12/09/2022



Aeonium arboreum
La Serre Extraordinaire
No.s.07
12/09/2022



Dahlia Pinnata
North Entrance
No.s.08
12/09/2022



Le Jardin De La Réciprocité
No.s.09
12/09/2022

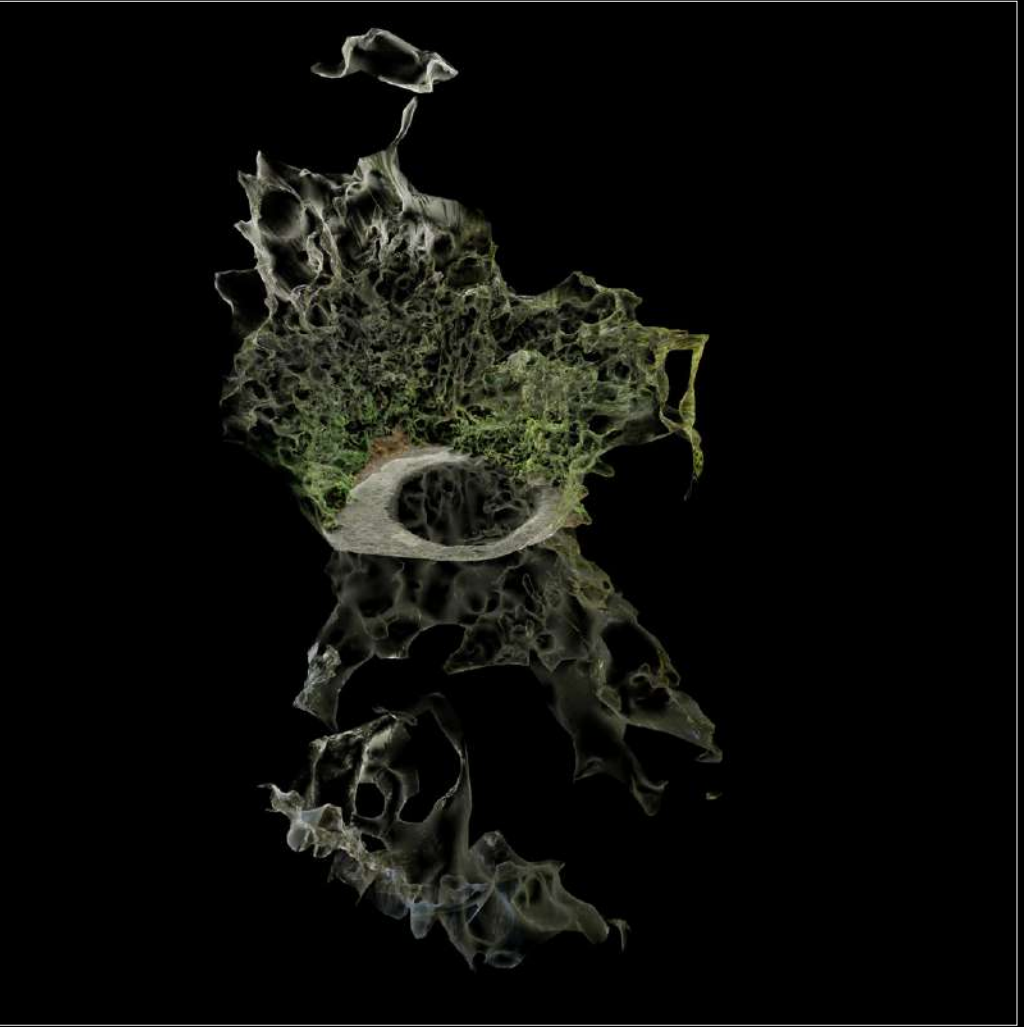


Le Jardin Eaurmus
No.s.20
12/09/2022



Hydrangea macrophylla

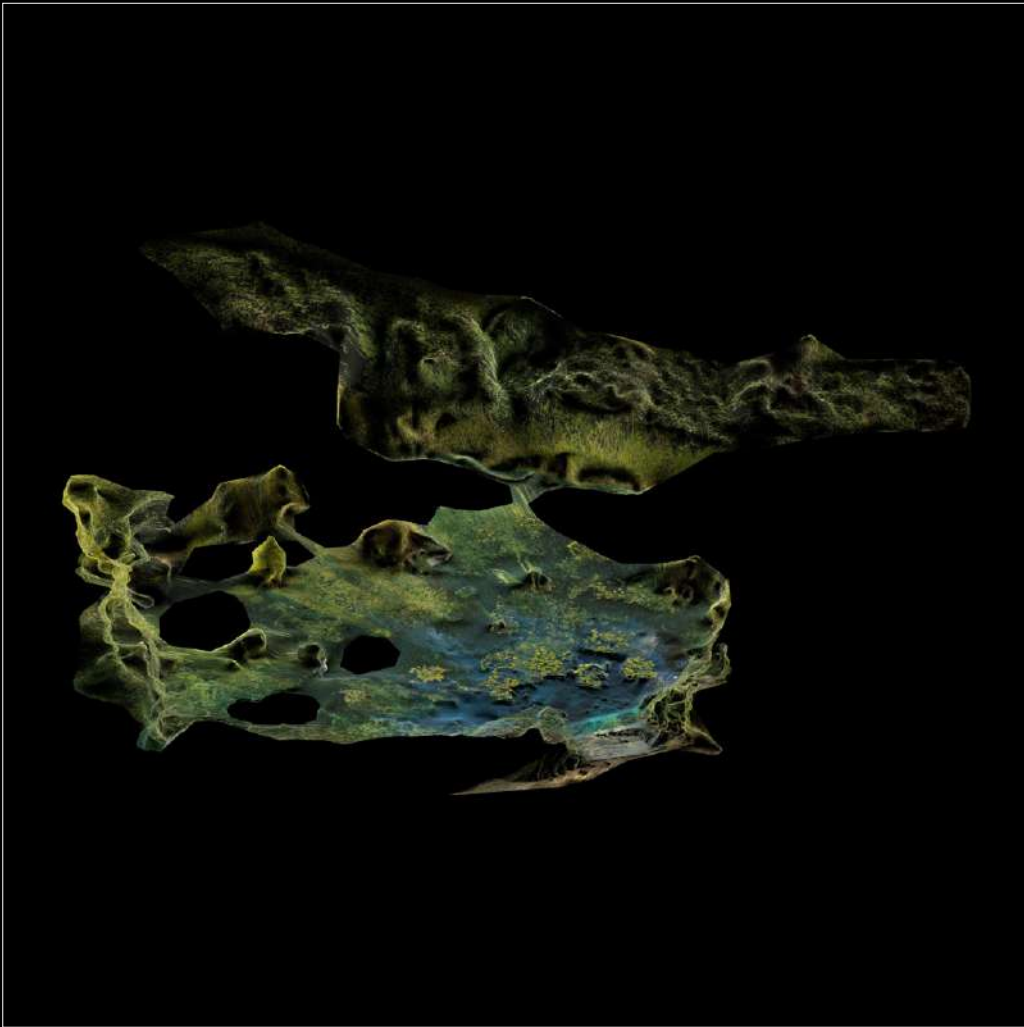
Festival Area
No.s.21
12/09/2022



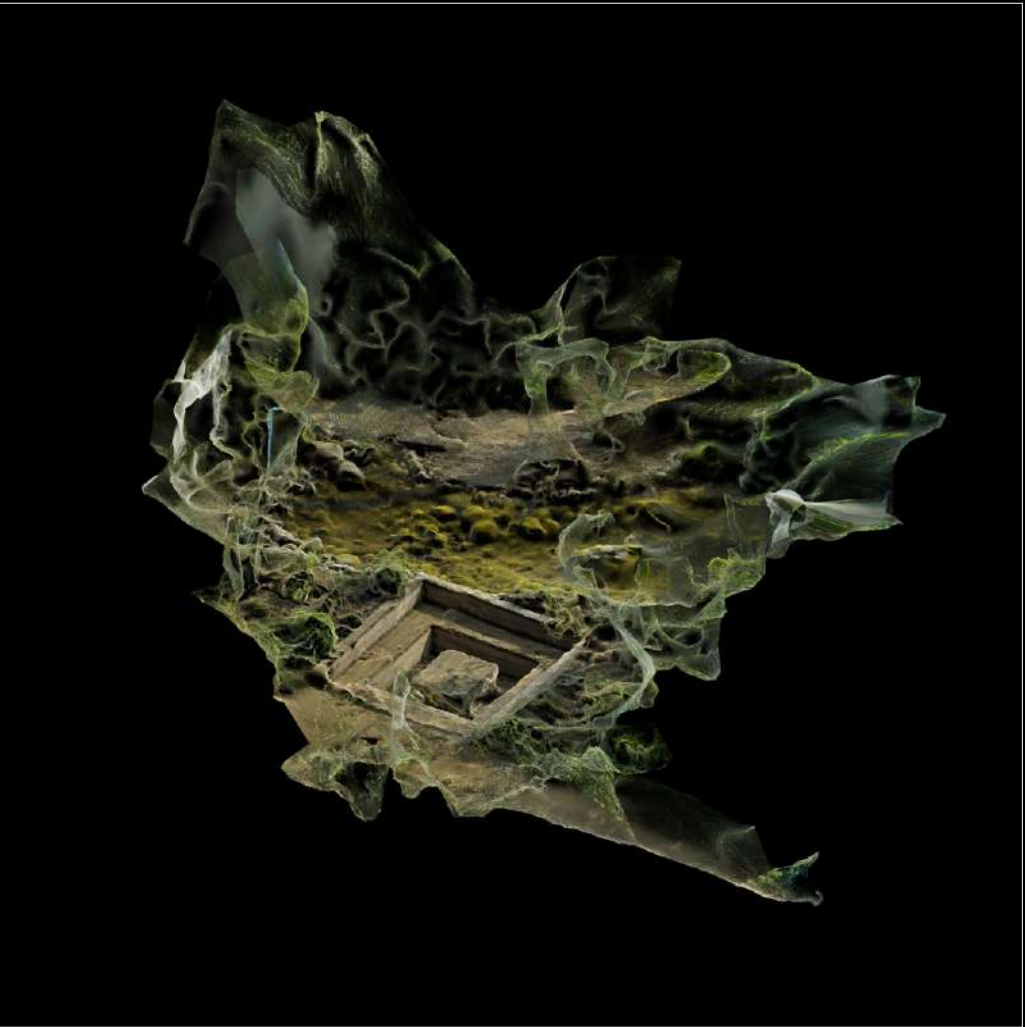
Le Jardin De La Réciprocité
No.s.22
12/09/2022



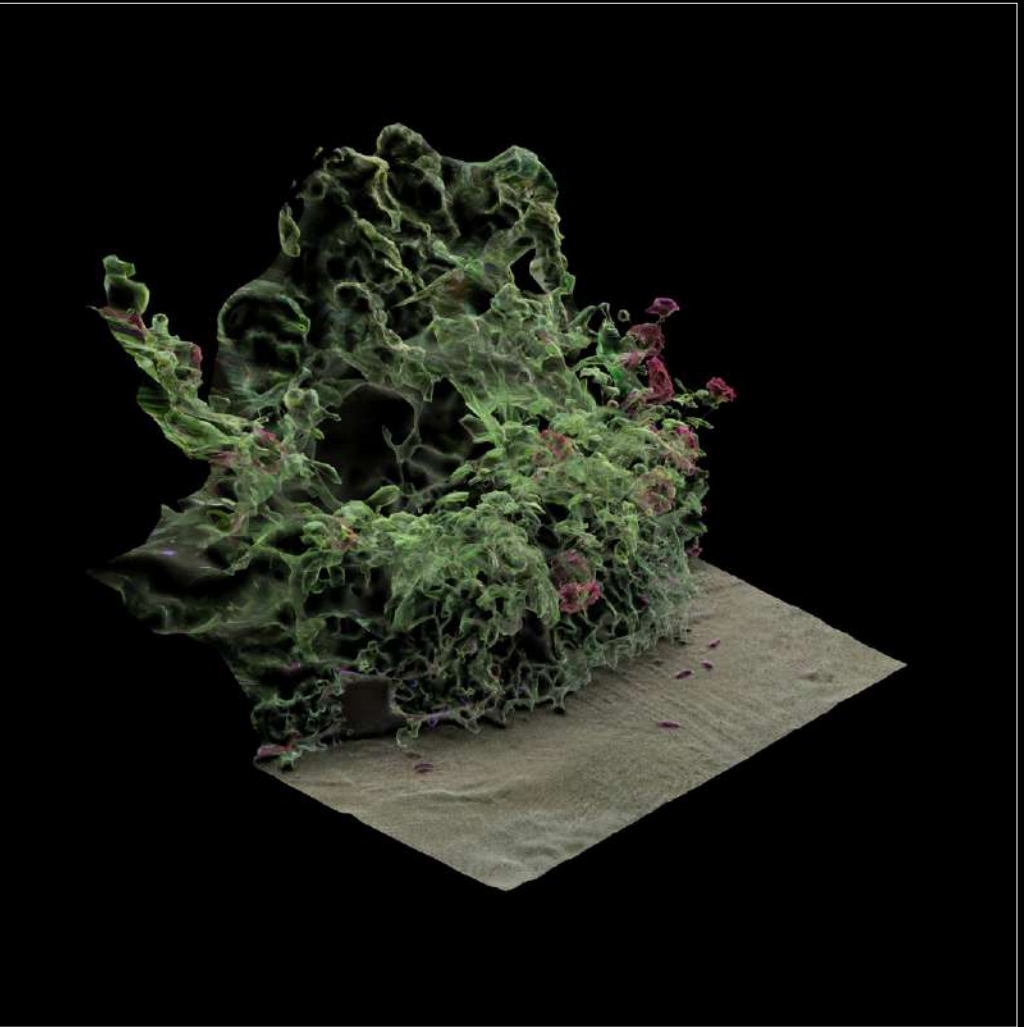
Le Cocon Végétal
No.s.23
12/09/2022



Pond in the Festival Area
Domaine de Chaumont-sur-Loire
No.s.24
12/09/2022



Ma Maison Est Un Jardin
No.s.25
12/09/2022



Stables (Écuries)
No.t.02
12/09/2022



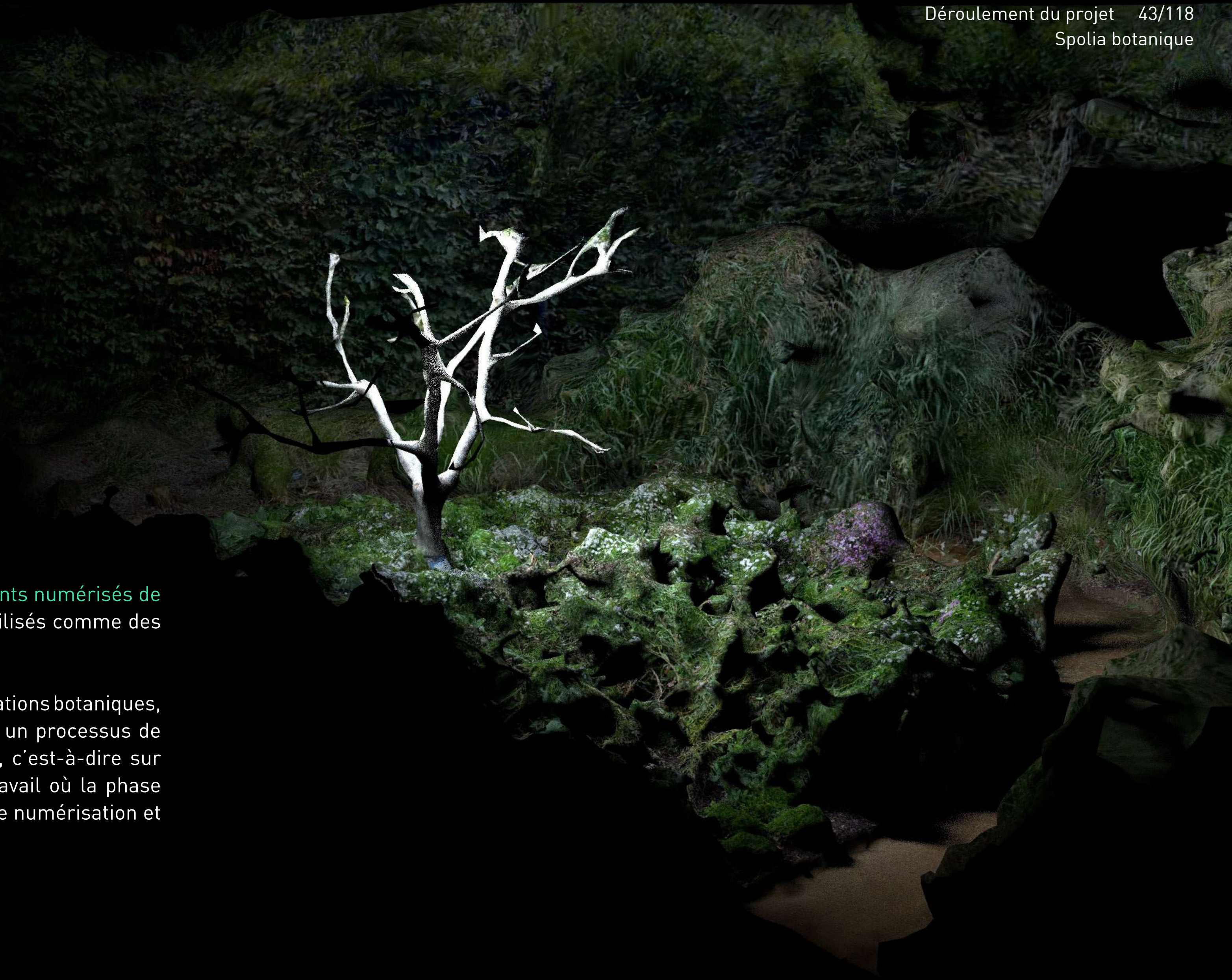
Echeveria agavoides, Crassula ovata

La Serre Extraordinaire
No.t.03
12/09/2022

Recomposition classique

Nous avons réalisé des **collages 3D en recomposant les fragments numérisés de réalités botaniques disparates**. Ces collages 3D sont ensuite utilisés comme des environnements immersifs à explorer en réalité augmentée.

Dans cette étape, nous avons exploré les façons dont nos numérisations botaniques, comme des composantes spatiales, pourraient intervenir dans un processus de conception avec lequel l'architecte est plus ou moins familier, c'est-à-dire sur ordinateur. Nous avons exploré et élaboré une méthode de travail où la phase intermédiaire de dessin se fait sur ordinateur ; entre la phase de numérisation et la phase de l'expérience immersive.





Ces articulations nécessaires nous ont fait éloigner des logiciels de BIM comme Revit qui fait rapprocher l'architecture aux mondes de l'ingénierie, de commerce et de standardisation, loin de la flexibilité technique, théorique et artistique dont le métier a besoin pour s'innover de nouveaux à l'ère de l'intelligence artificielle.

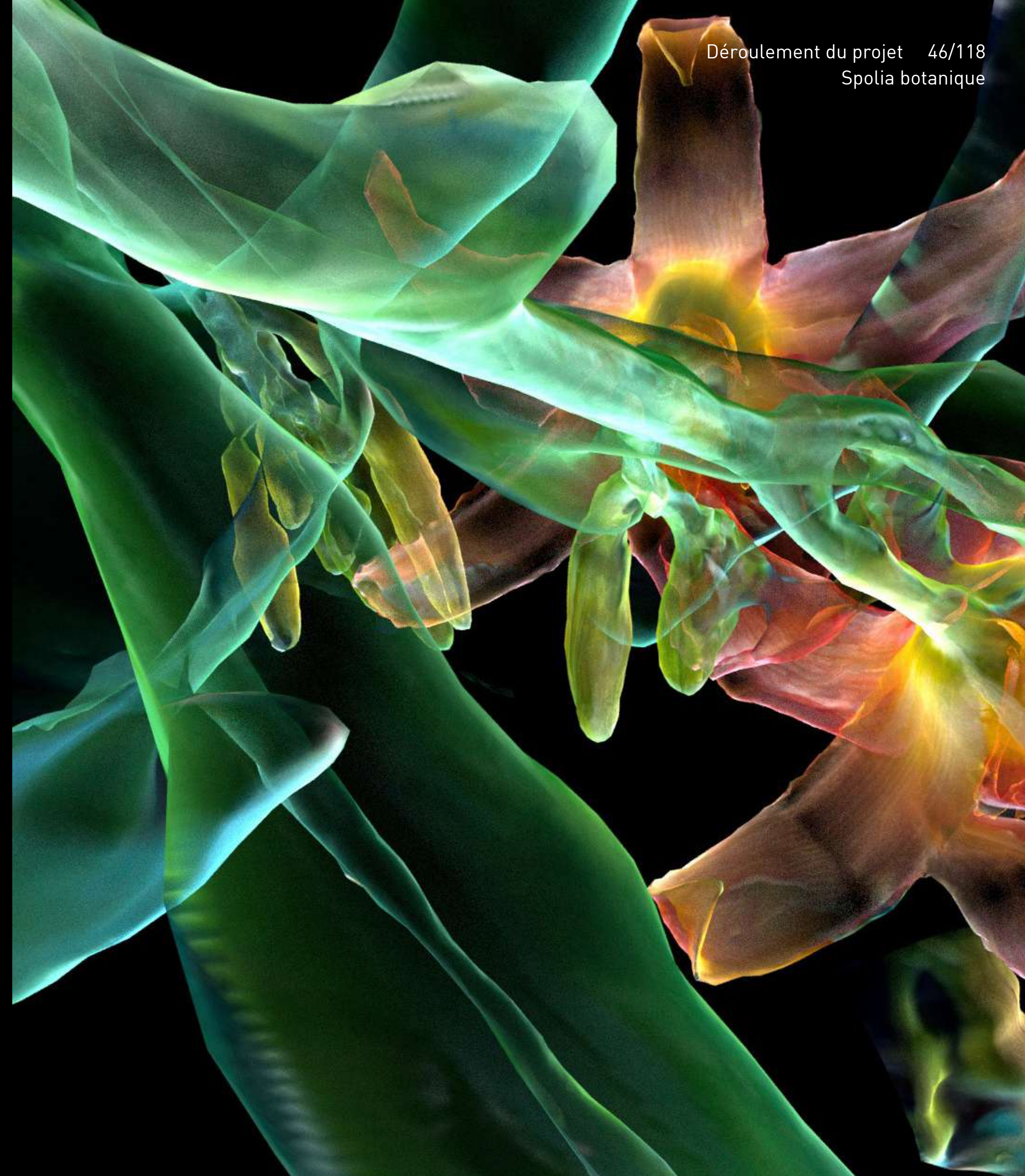
Nos collages 3D, ces **jardins virtuels recyclés**, sont faits avec le logiciel Cinema 4D, souvent utilisé dans les arts numériques. Une fois réalisé, le jardin est visualisé et testé en réalité augmentée. Suivant les résultats, le modèle est ensuite remodifié sur ordinateur. Cette **alternance entre Cinema 4D et la réalité augmentée** peut se répéter autant de fois que nécessaire.

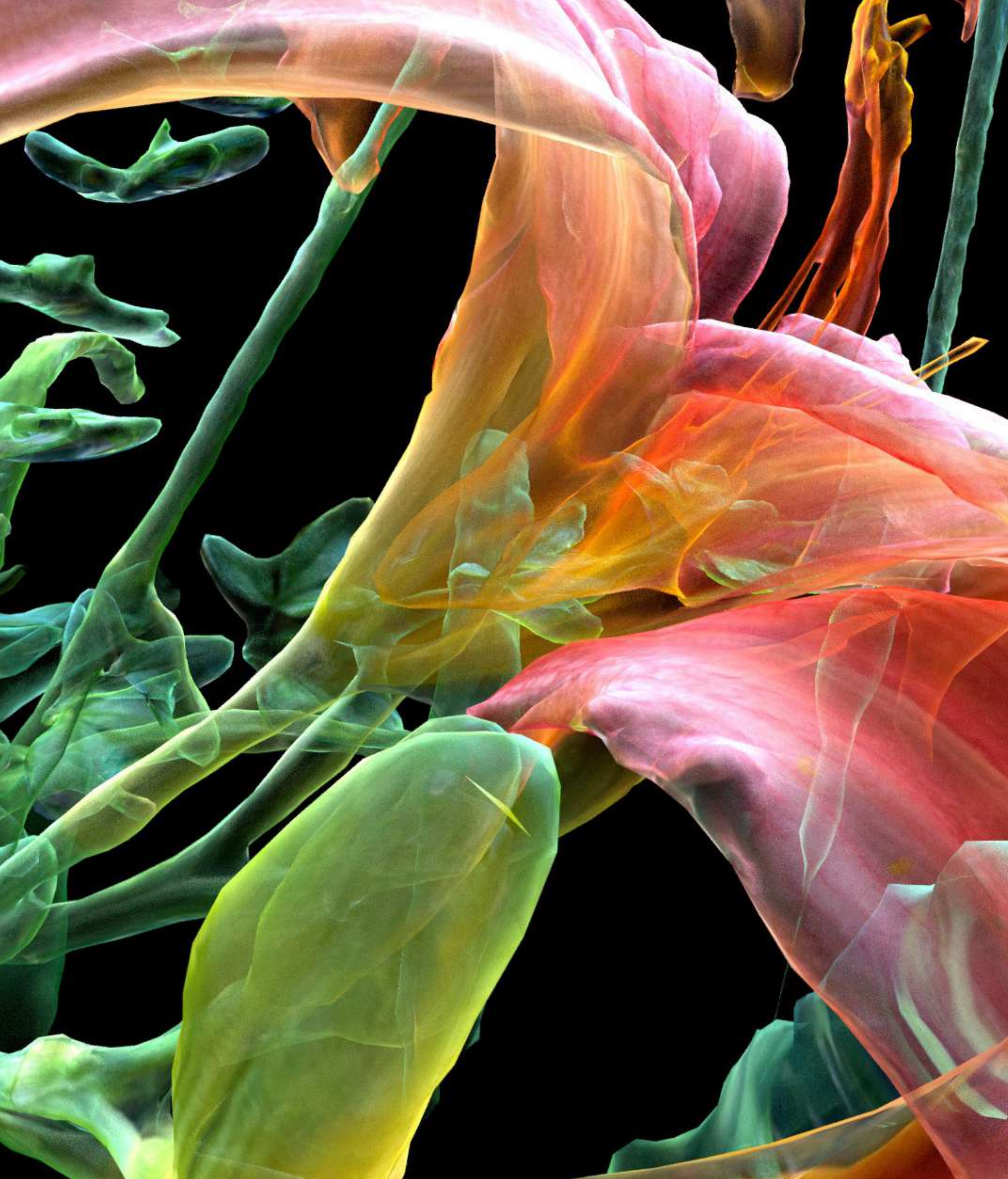


Recomposition immersive

Après ces premières expérimentations, nous avons exploré les façons dont la réalité augmentée pourrait être utilisée directement au moment de la conception. Nous avons cherché à **écarter l'ordinateur pendant la conception** ; et de dessiner nos « **spolias de jardin** » d'une façon **immersive, spatiale et immédiate** autour de nous à l'aide d'un iPad ou iPhone.

L'une des notions essentielles qui ont émergé durant notre travail de R&D est « **l'esquisse immersive** ». Les environnements tridimensionnels conçus entièrement en réalité augmentée sont assez efficaces et impressionnants, mais ils nécessitent quand même une **finalisation sur ordinateur** pour des résultats plus précis. Ces modèles alors ne se présente pas comme un résultat final, mais une première **esquisse spatiale** qui facilite la conception finale. Il nous semble que la réalité augmentée propose aujourd'hui une **mise à jour importante de l'esquisse traditionnelle de l'architecte**. Ces dessins intuitifs et rapidement faits ne sont plus limités par la surface d'un papier, mais se spatialisent autour de nous.





Dans cette étape, nous avons utilisé [Reality Composer](#), l'application développée par Apple pour la conception des expériences immersives. Cette application nous permet d'importer nos composants et de les réassembler en réalité augmentée. En plus des manipulations classiques comme la mise à l'échelle et la rotation, elle permet de les animer, de leur ajouter des comportements interactifs et des sons. Une fois que la composition est faite, on l'importe dans Cinema 4D pour l'utiliser comme référence et faire un modèle final plus précis. Nous visualisons ensuite ce modèle en réalité augmentée pour le tester, et si besoin nous refaisons des modifications dans Cinema 4D. Comme dans l'étape précédente, cette alternance peut se répéter autant que nécessaire.

En conclusion, la réalité augmentée n'efface pas actuellement l'ordinateur pendant la conception, mais l'enrichit avec « l'esquisse immersive ». Elle introduit un processus d'aller-retour entre l'ordinateur et la tablette, une alternance entre la représentation bidimensionnelle et la représentation spatiale.

Développement

Pour développer les trois applications, nous avons utilisé les outils de développement fournis par Apple.

Logiciels:

Xcode, Reality Composer, Reality Converter

Frameworks:

RealityKit, ARKit, SceneKit, UIKit, MetalKit, Foundation, QuickLook, Swift UI, Model IO.

Par application :

Floral Tracer

Pour enregistrer les gestes de l'utilisateur, nous travaillons avec les données relatives aux mouvements du portable détectés par son gyroscope. On calcule les changements relatifs et positionne une fleur devant le portable à 50 cm de distance.

Festum virtual

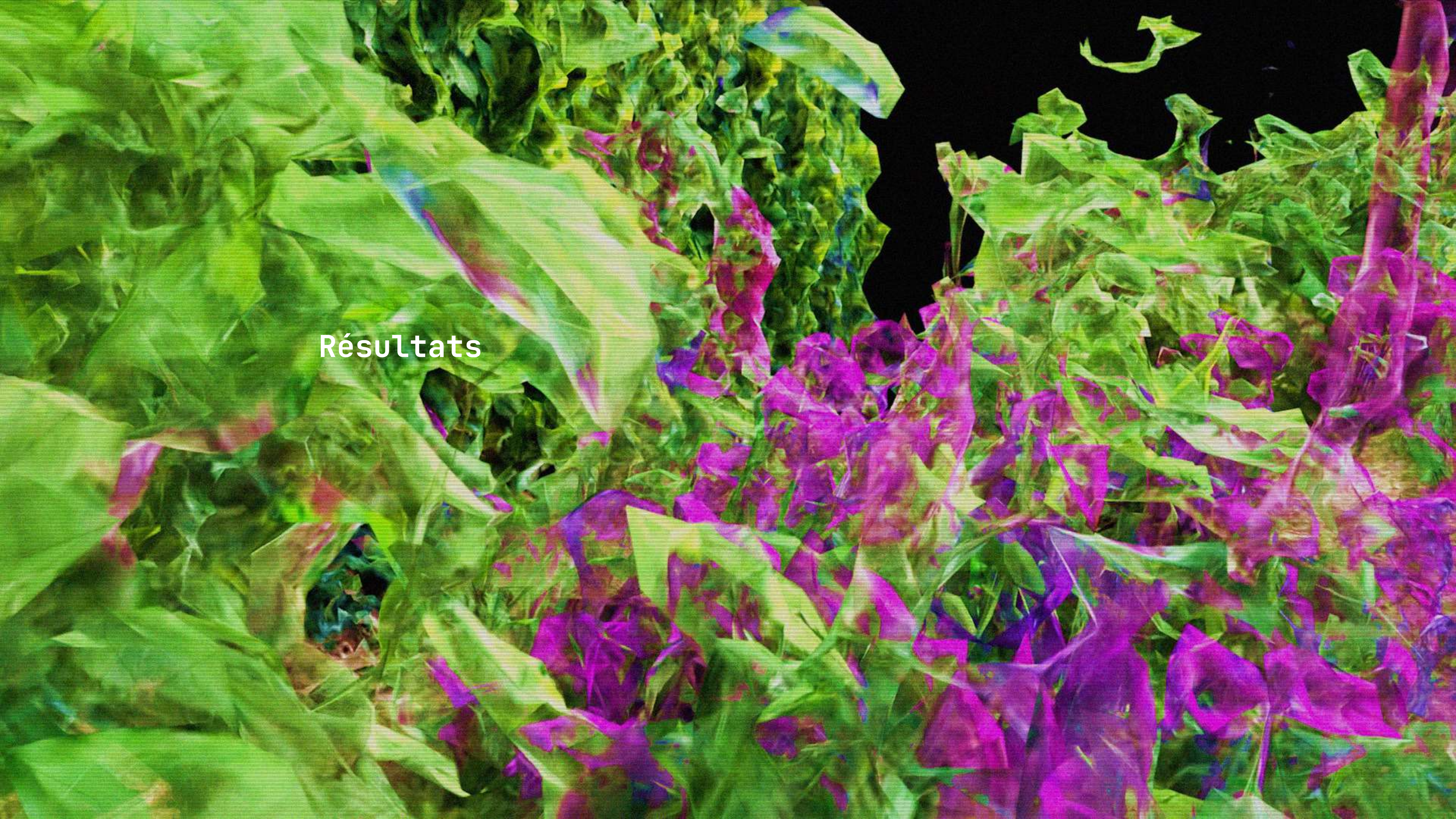
Visualisation des modèles 3D sans réalité augmentée : SceneKit

Visualisation des modèles en réalité augmentée : RealityKit

Spolia botanique

Visualisation des expériences immersive : RealityKit (format .rcproject)



A close-up photograph of a dense cluster of plants. The plants feature large, broad green leaves on the left and smaller, more delicate purple leaves on the right. The background is solid black, which makes the vibrant colors of the foliage stand out. The text "Résultats" is overlaid in white on the left side of the image.

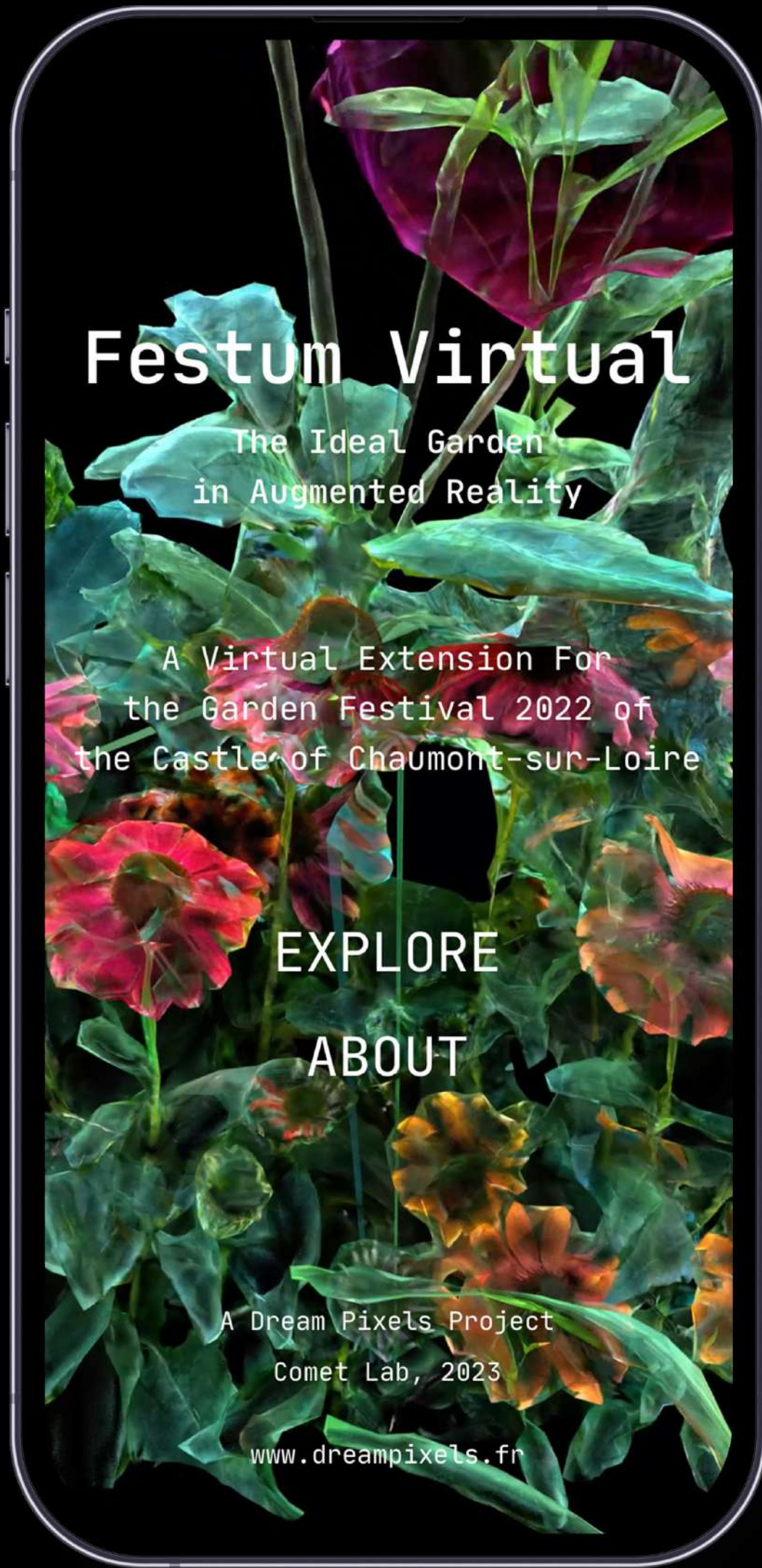
Résultats

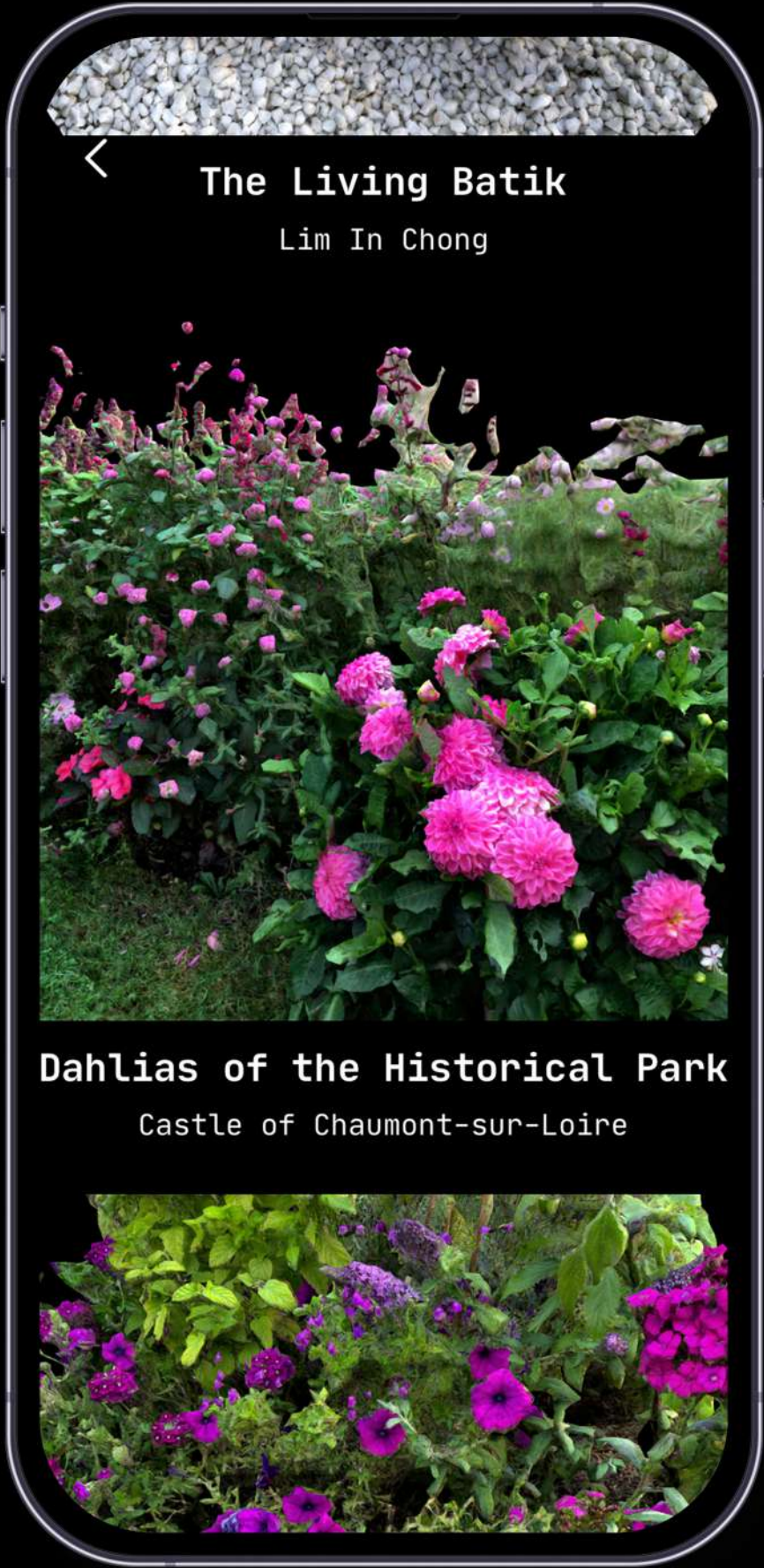
Festum virtual

Floral Tracer est un outil expérimental de conception immersive qui traduit vos mouvements corporels en jardins virtuels. Imaginez votre corps comme un pinceau qui peint des pétunias, et l'espace comme votre toile botanique. Transformez votre environnement en un rêve botanique.

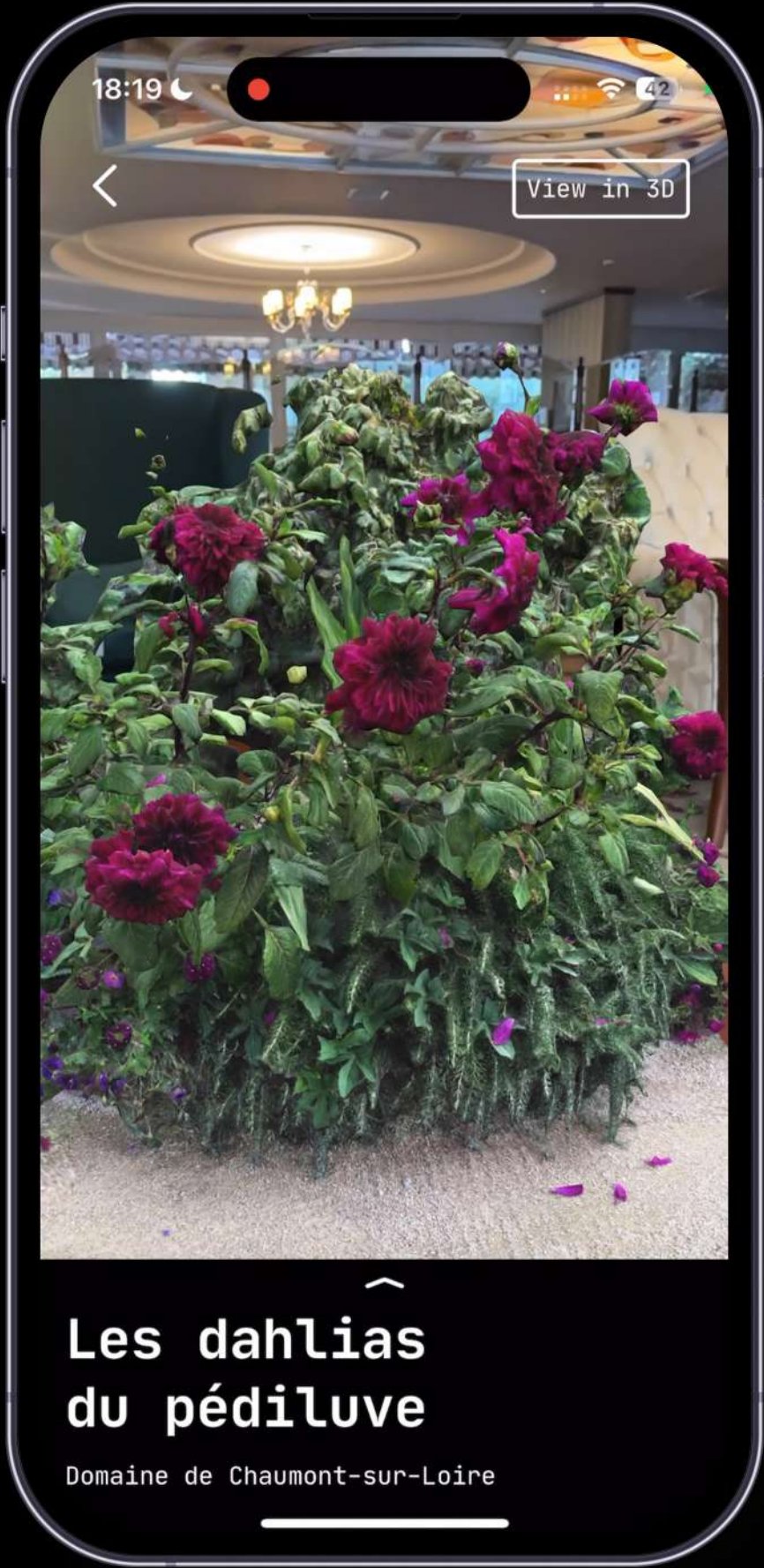
Plus qu'un outil de design destiné aux professionnels, notre application offre une expérience artistique unique à la portée de tous les utilisateurs. Au cours de cette expérience, nous vous invitons à regarder l'architecture à travers les mouvements qu'elle génère, et à vous considérer comme une source de vie végétale.

Rejoignez notre expérience de botanique virtuelle et explorez la relation que le corps humain entretient avec des espaces hybrides où l'image et l'intelligence sont spatialisées.





Liste des jardins



Vue en réalité augmentée



Vue en réalité augmentée



Vue 3D

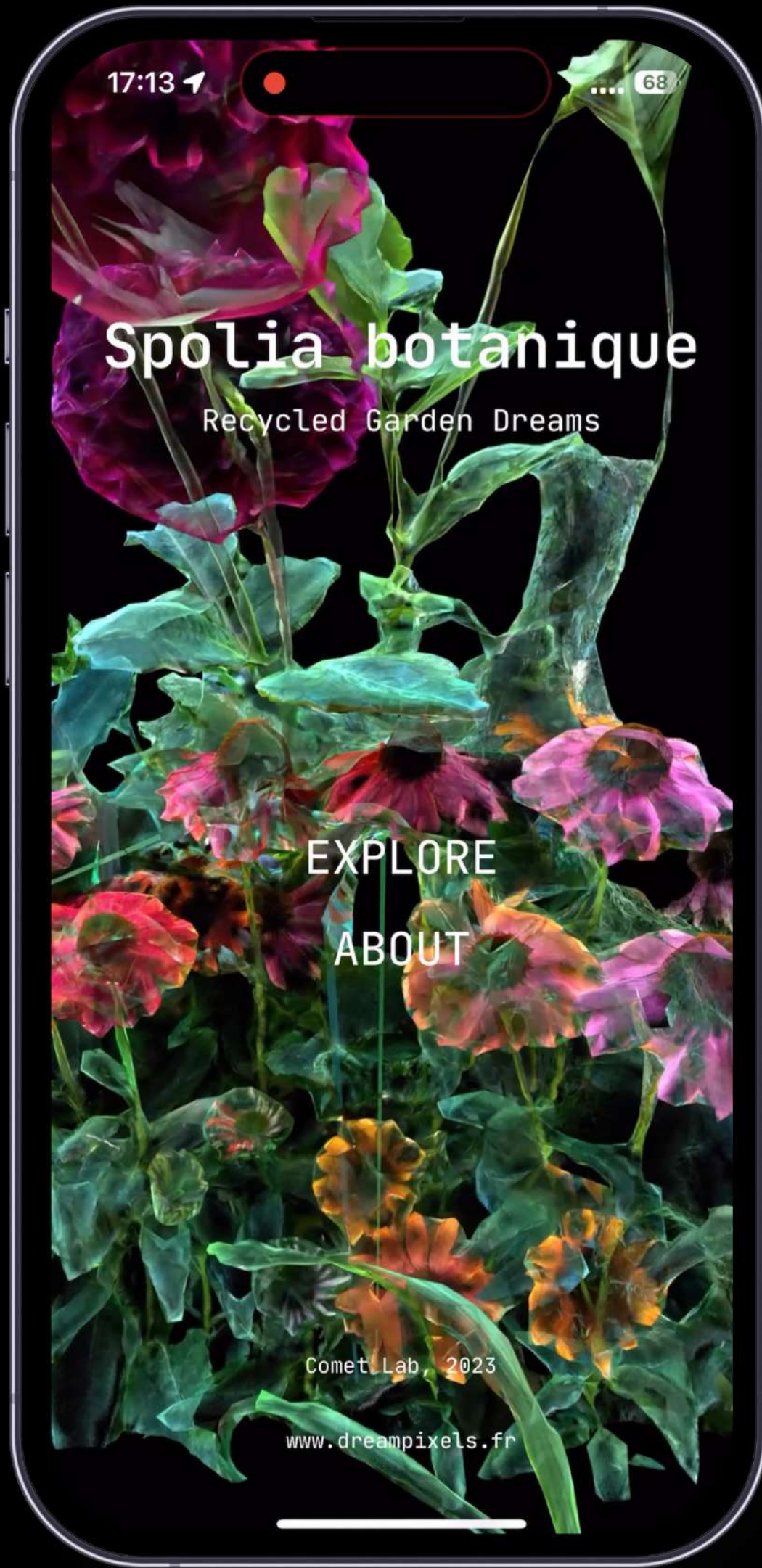
Spolia botanique

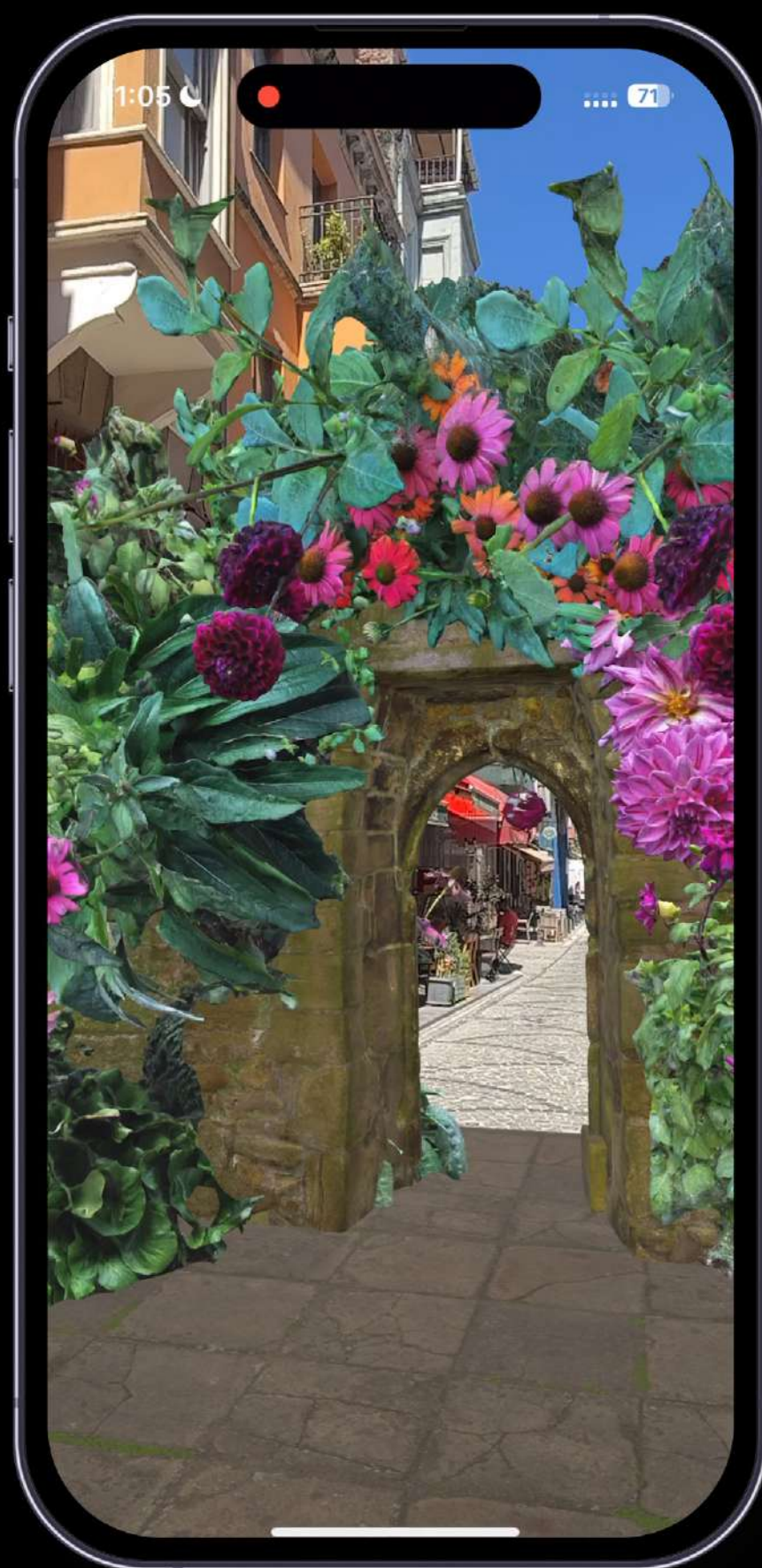
Spolia botanique propose des expériences immersives dans des jardins virtuels. Nous avons créé ces jardins en **recyclant et recomposant** les jardins que nous avons numérisés. Pour les animer, nous avons incorporé des animaux et des enregistrements sonores réalisés dans des forêts. Des colibris volent autour et de grands papillons se reposent sur les fleurs. L'application présente trois jardins :

Le Rêve d'Échinacée offre une **augmentation atmosphérique** de notre environnement immédiat. Marchez à travers les particules de fleurs flottant dans l'air. Ce jardin ne remplace pas l'environnement physique environnant, mais offre seulement un enrichissement volumétrique.

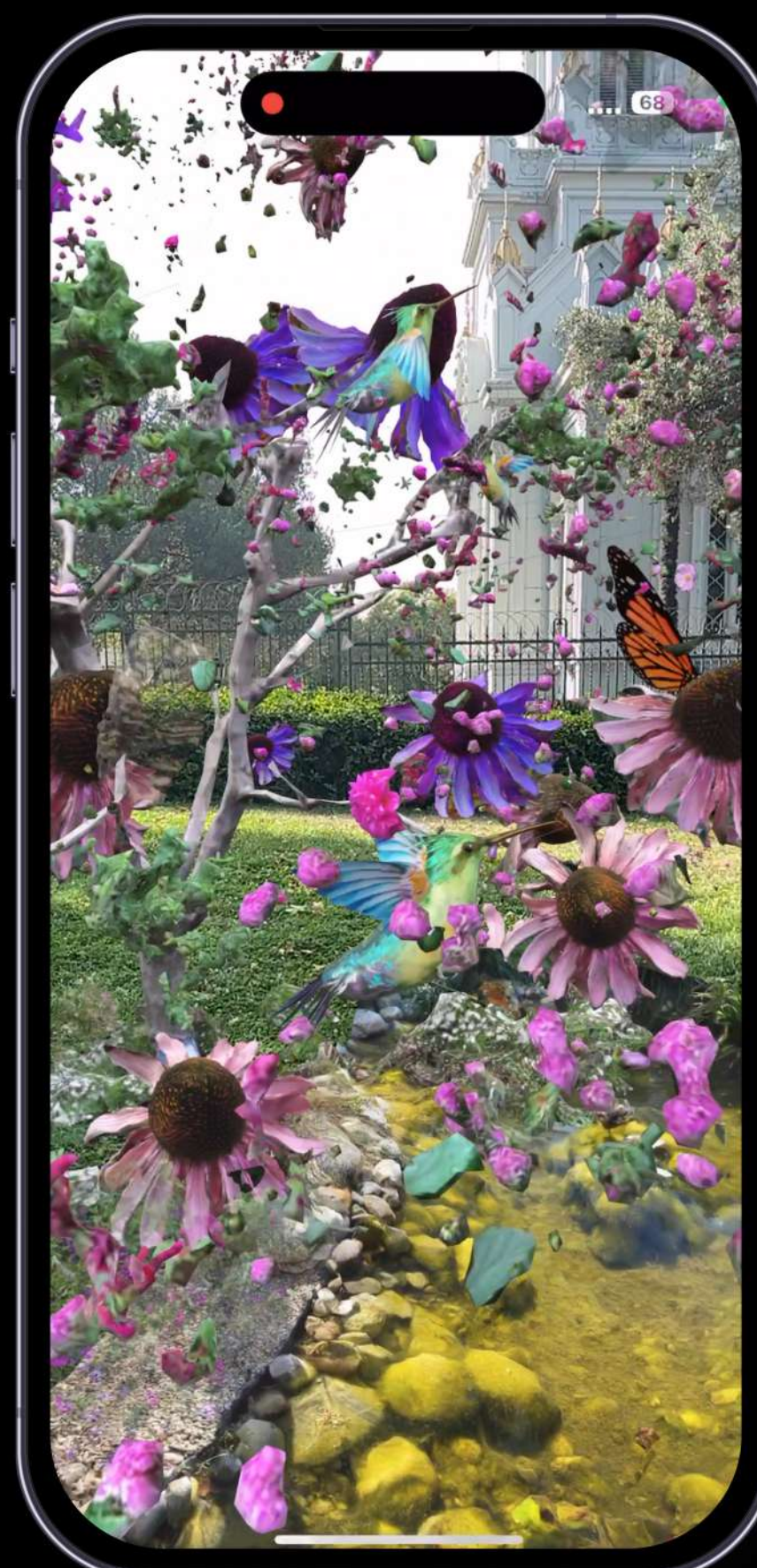
La Porte du Botaniste fusionne votre environnement physique avec une **architecture imaginaire**. Explorez les ruines virtuelles où différentes fleurs ont trouvé refuge et une **seconde vie**.

La Forêt de Dahlias vous **téléporte dans une forêt virtuelle** luxuriante. Échangez votre environnement physique avec ce rêve botanique dense et élevé.





La porte virtuelle visualisée dans une rue



Un jardin virtuel intégré dans un parc réel



L'immersion dans la forêt



Le jardin d'échinacée

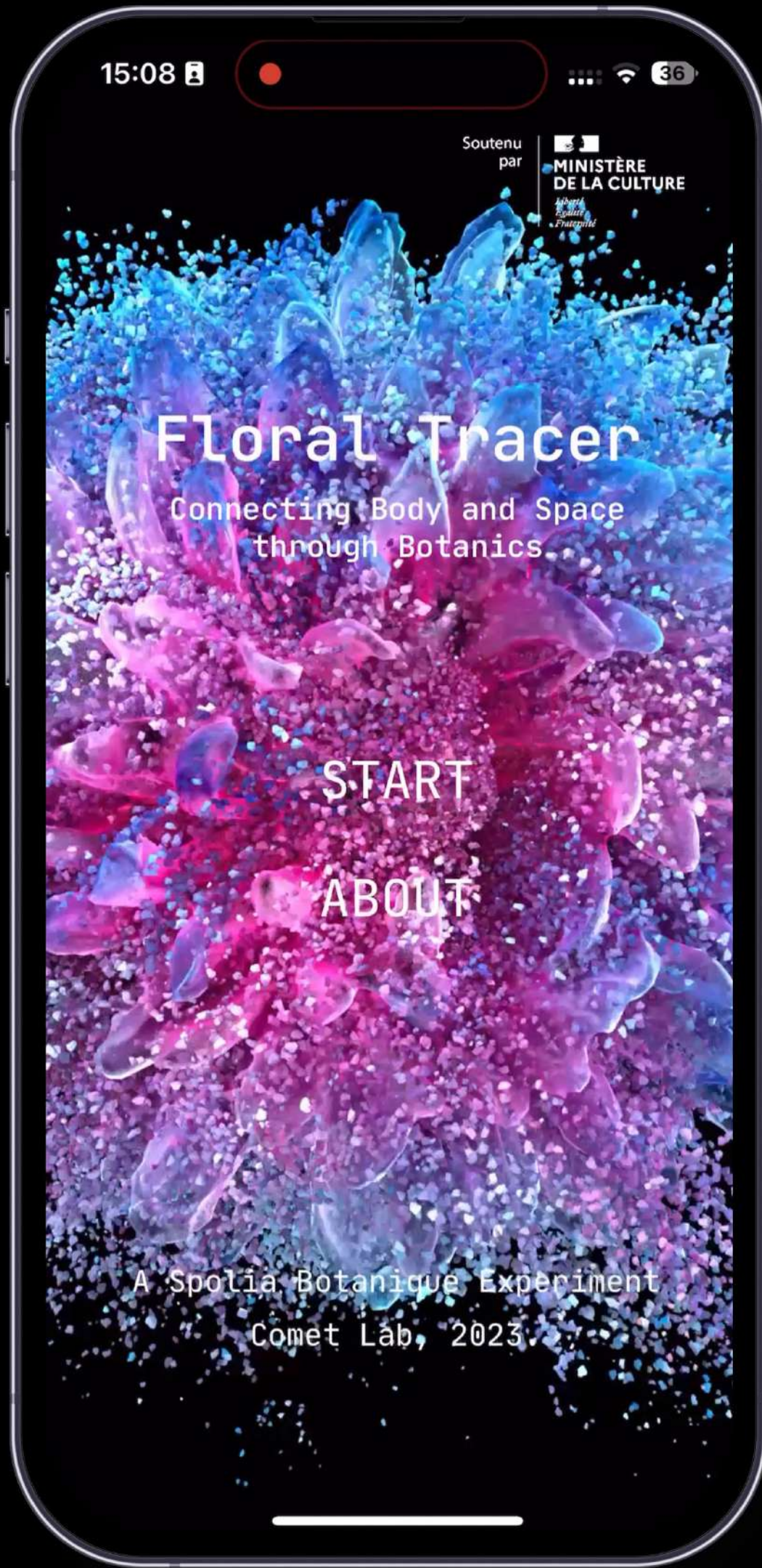


Floral Tracer

Floral Tracer est un **outil expérimental de conception immersive** qui traduit vos **mouvements corporels en jardins virtuels**. Imaginez votre corps comme un pinceau qui peint des pétunias, et l'espace comme votre toile botanique. Transformez votre environnement en un rêve botanique.

Plus qu'un outil de design destiné aux professionnels, notre application offre une expérience artistique unique à la portée de tous les utilisateurs. Au cours de cette expérience, nous vous invitons à regarder l'architecture à travers les mouvements qu'elle génère, et à vous considérer comme une source de vie végétale.

Rejoignez notre expérience de botanique virtuelle et explorez la relation que le corps humain entretient avec des espaces hybrides où l'image et l'intelligence sont spatialisées.



Les utilisateurs de l'application peuvent faire peupler les rues où ils se trouvent avec des jardins fantastiques. Ils ont accès à une série de compositions de base créées par les étudiants à partir des numérisations que nous ferons au Festival de jardins de Chaumont-sur-Loire. Les jardins du Festival recyclés de façon virtuelle par Comet Lab, et puis par les étudiants en architecture pourrons finalement être repris et recomposés par tous ceux qui souhaitent fabriquer une utopie botanique de leur ville. Nous souhaitons ainsi exploiter notre principe de « spolia botanique » ou le réemploi des ressources végétales à l'échelle de la planète.

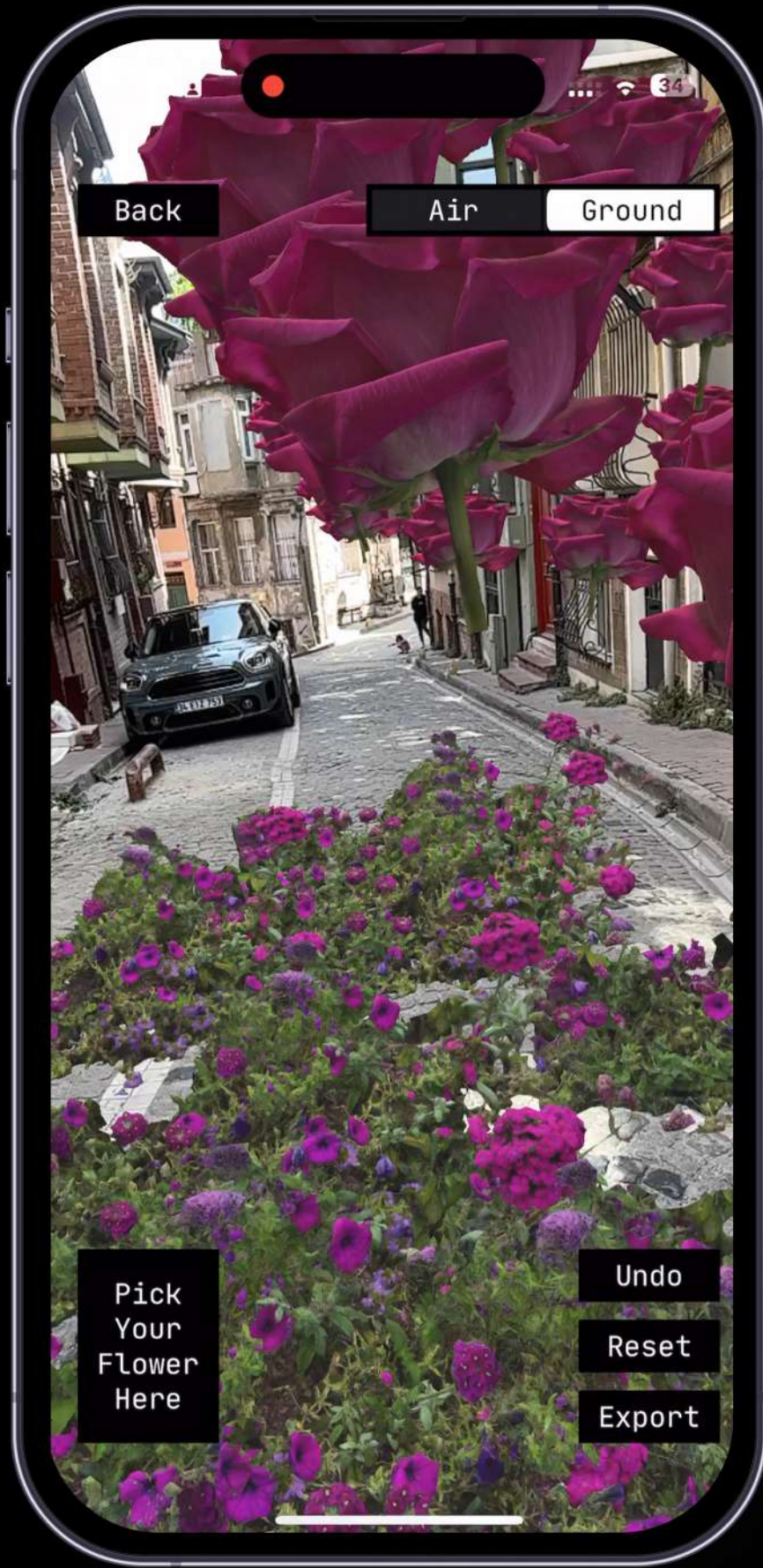
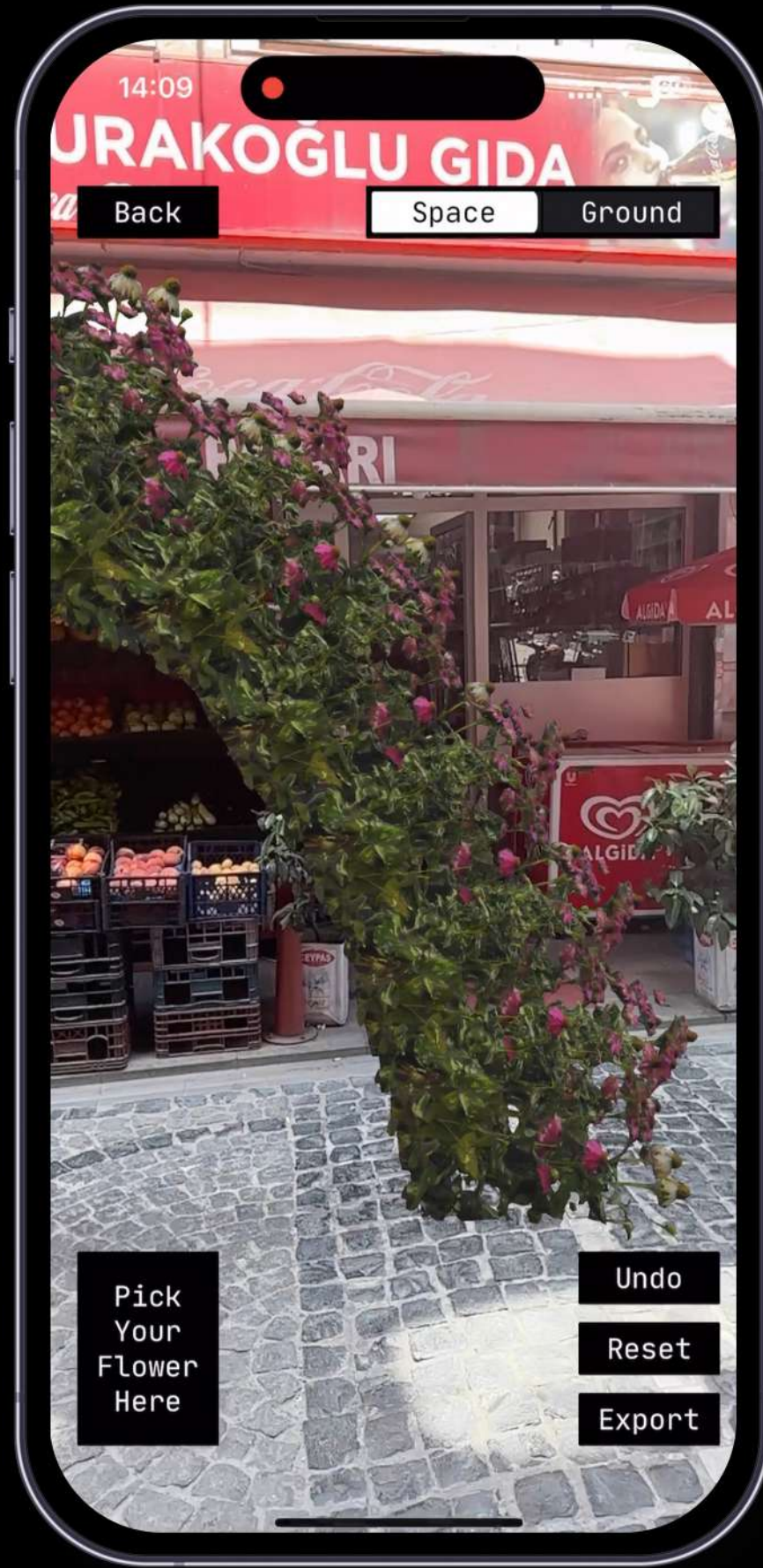
Une fois que la rue est transformée en une utopie botanique, l'utilisateur peut prendre une photo de sa création qui serait automatiquement téléchargée sur l'application. Ces images constitueront progressivement une carte qui révèle la fabrication en cours d'une toile botanique et virtuelle couvrant petit à petit les villes du monde entier. On pourrait ainsi voir fleurir les jardins suspendus de Paris sur la rue de Rivoli, ceux de Venise sur la Place Saint Marc ou ceux de Toyko sur le Shibuya Crossing...

Accessible par l'ensemble des utilisateurs, cette carte sera l'interface d'une nouvelle forme d'échange social se faisant à travers les imaginaires végétaux des villes. Dessinant une botanosphère virtuelle à travers les villes du monde, elle sera la révélation chlorophyllée d'une nouvelle vision plus inclusive, égalitaire et holistique de la ville et de la nature.

Dahlia pinnata

Scan no. s013
Étables

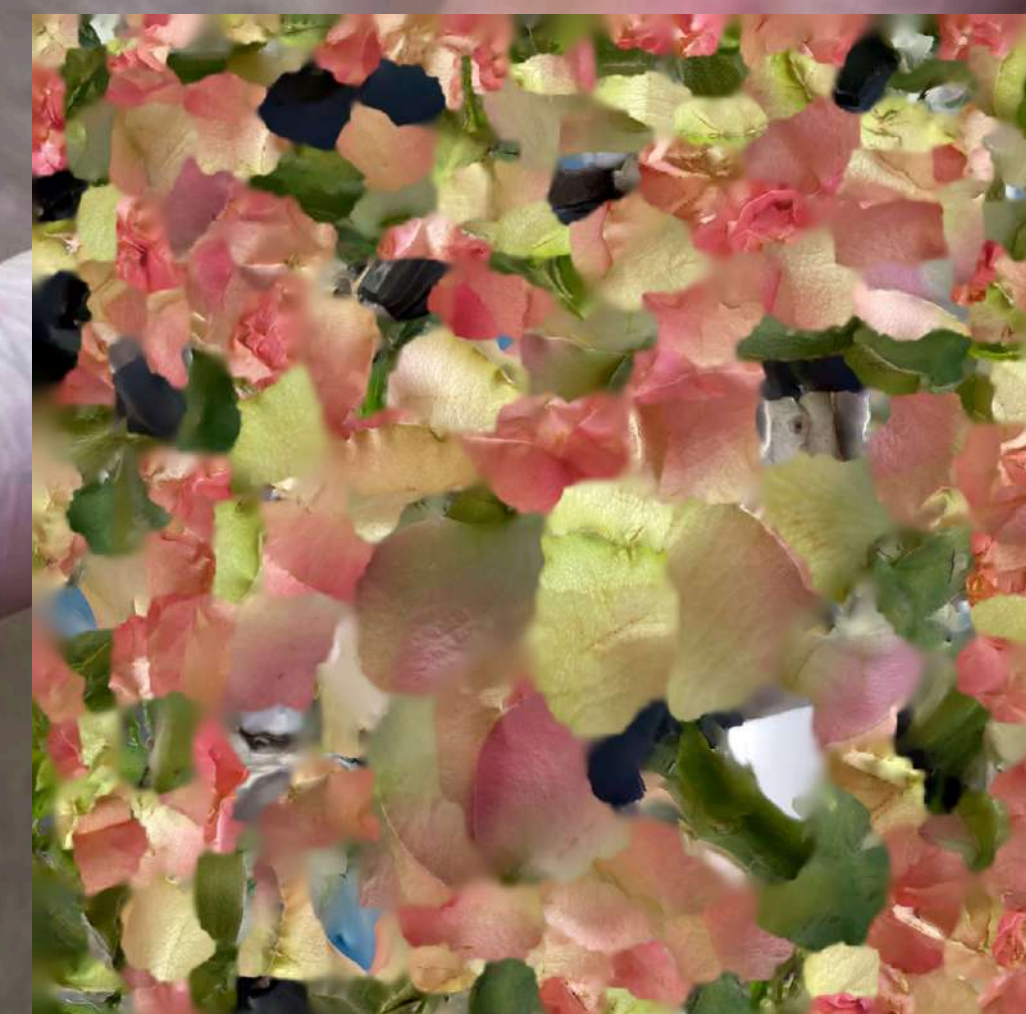
Domaine de Chaumont-sur-Loire







Détail d'une rose numérisée



Texture résultante de la numérisation

SPOLIA BOTANIQUE

Recycled Garden Dreams

Please choose an app:



Floral Tracer



Festum Virtual



Spolia botanique

Expérience avec Apple Vision Pro

Comme les applications sont développées avec les outils proposés par Apple, elles seront compatibles avec le casque de réalité mixte d'Apple, qui sera lancé en France en 2024.

Pick some flowers to explore:



Rose
Cabaret



Peony
Sarah Bernhardt



Echinacea
A Grain of Hope



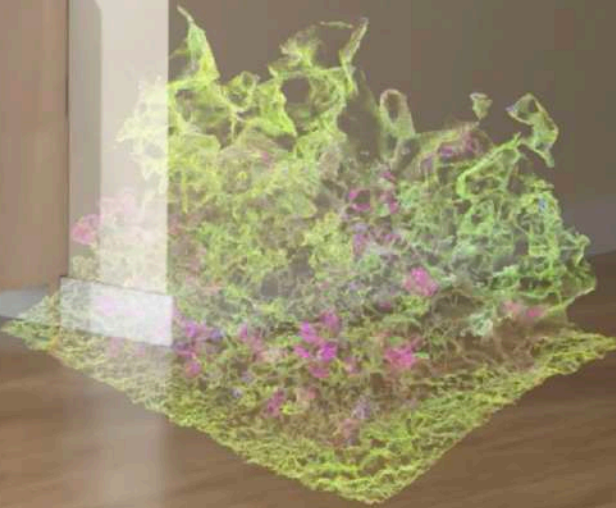
Impatiens walleriana
Stables



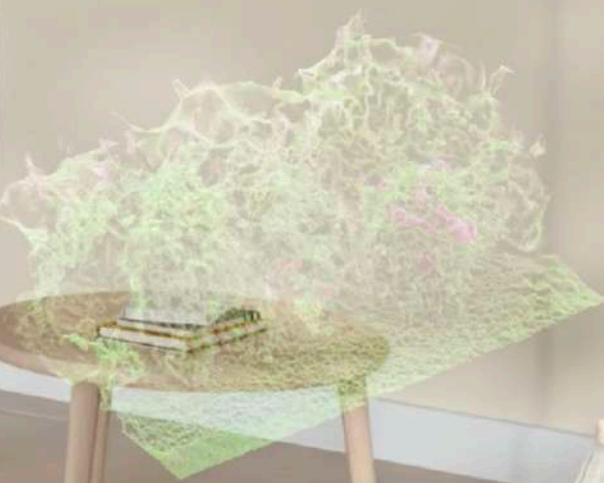
Chrysanthemum
Intermediate Incurved



Peony
Amabilis

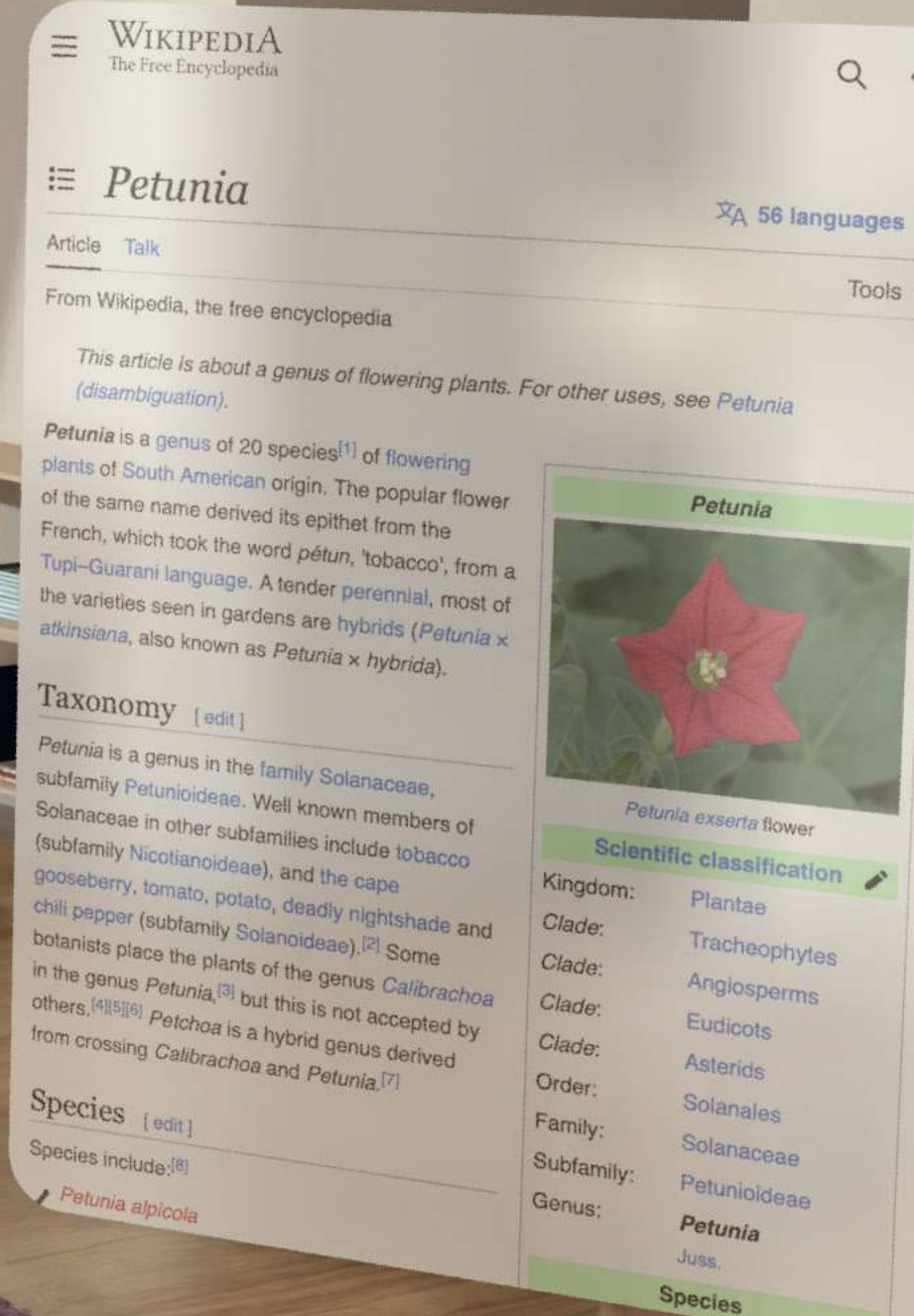


Petunia hybrida
Stables



Dahlia pinnata
Historical Park

www.wikipedia.com



Le rêve d'échinacée dans votre séjour : une augmentation atmosphérique.



Particules d'arômes

Nous avons expérimenté avec des simulations de particules et de fluides afin d'examiner la possibilité de rendre visibles les flux d'arômes et de nectars — des composés volatiles invisibles et attractifs sécrétés par les plantes dans l'air. Nous avons également souhaité révéler les couleurs vives et agréables de cet univers végétal bigarré qui nous entoure.

Nectars sécrétés par les fleurs de dahlia
dans le Domaine de Chaumont-sur-Loire.





Nectars sécrétés par les fleurs d'échinacée, de dahlia,
de géranium, de camomille et de bugle dans le Domaine
de Chaumont-sur-Loire.





Hologrammes botaniques

Nous avons expérimenté différents rendus visuels pour révéler à la fois les couleurs bariolées de la vie végétale et les formes géométriques de leur nouvelle « vie » virtuelle. L'objectif était de concevoir un effet visuel qui mêle le botanique au virtuel. Nous avons ainsi conçu un rendu final qui projette des hologrammes floraux et construit l'imaginaire d'une botanique virtuelle.

Nous avons positionné des caméras pour simuler le point de vue d'une fourmi ou d'un papillon. Divers types de lumières virtuelles ont été animés pour imaginer des scènes de nuits fantastiques ou pour transformer une plante en protagoniste d'une scène dramatique.

MatTexGenOSLMapOthEmsMedC4D

Octane material

Mix material

Composite material

Layered material

Hair material

Sub material

Material layer

Image texture

Rgb spectrum

Gaussian spectrum

Float

W Coordinate

Baking texture

Image tiles

OSL texture

OSL[/]

OSL[vectron]

OSL[MA]

OSL[camera]

OSL[utils]

OSL[noise]

OSL[pattern]

OSL[projection]

Transform

Projection

Checker

Dirt

Falloff

Marble

Octane noise

Random color

Ridged fractal

Sine wave

Side

Turbulence

Instance color

Instance range

Toon ramp

Clamp texture

Color correction

Cosine mix

Octane gradient

Invert

Mix

Multiply

Add

Subtract

Compare

Triplanar

Uvw transform

Displacement

Vertex displacement

Blackbody emission

Texture emission

Absorption medium

▼ Dirt texture

o Dirt map

▼ Falloff map

▼ Invert texture

o Texture

▼ Add texture

o Texture1

o Texture2

▼ Multiply texture

o Texture1

o Texture2

▼ Greyscale color

▼ Texture emission

o Texture

o Distribution

▼ Bitmap

▼ Greyscale color

▼ RgbSpectrum

▼ RGB color

▼ Falloff map

▼ Round edges

▼ f0Sxray

o Albedo

o Specular

o Metallic

o Roughness

o Rotation

o Sheen

o Sheen roughness

o Sheen bump

o Sheen normal

o Coating

o Coating roughness

o Coating bump

o Coating normal

o 1/IDR map

o Film Width

o Bump

o Normal

o Displacement

o Opacity

o Transmission

o Emission

o Medium

o Round edges

o Material layer

BasicAlbedoSpecularMetallicRoughness

AnisotropySheen layerCoating layerThin film layerBump

NormalDisplacementOpacityDispersionIOR

TransmissionEmissionMediumRounded edgesCommon

Material layerEditorAssign

▼

Diffuse

◇ Color

R < 0.9 >

G < 0.9 >

B < 0.9 >

◇ Float

< 0 >

> Texture

▼

f01x.jpg

Sampling MIP

Blur Offset < 0 % >

Blur Scale < 0 % >

Resolution 4096 x 4096, RGB (8 Bit), sRGB IEC61966-2.1

◇ Mix

< 1. >

Création d'un matériau holographique pour les modèles numérisés

Une pivoine holographique



Modèle 3D

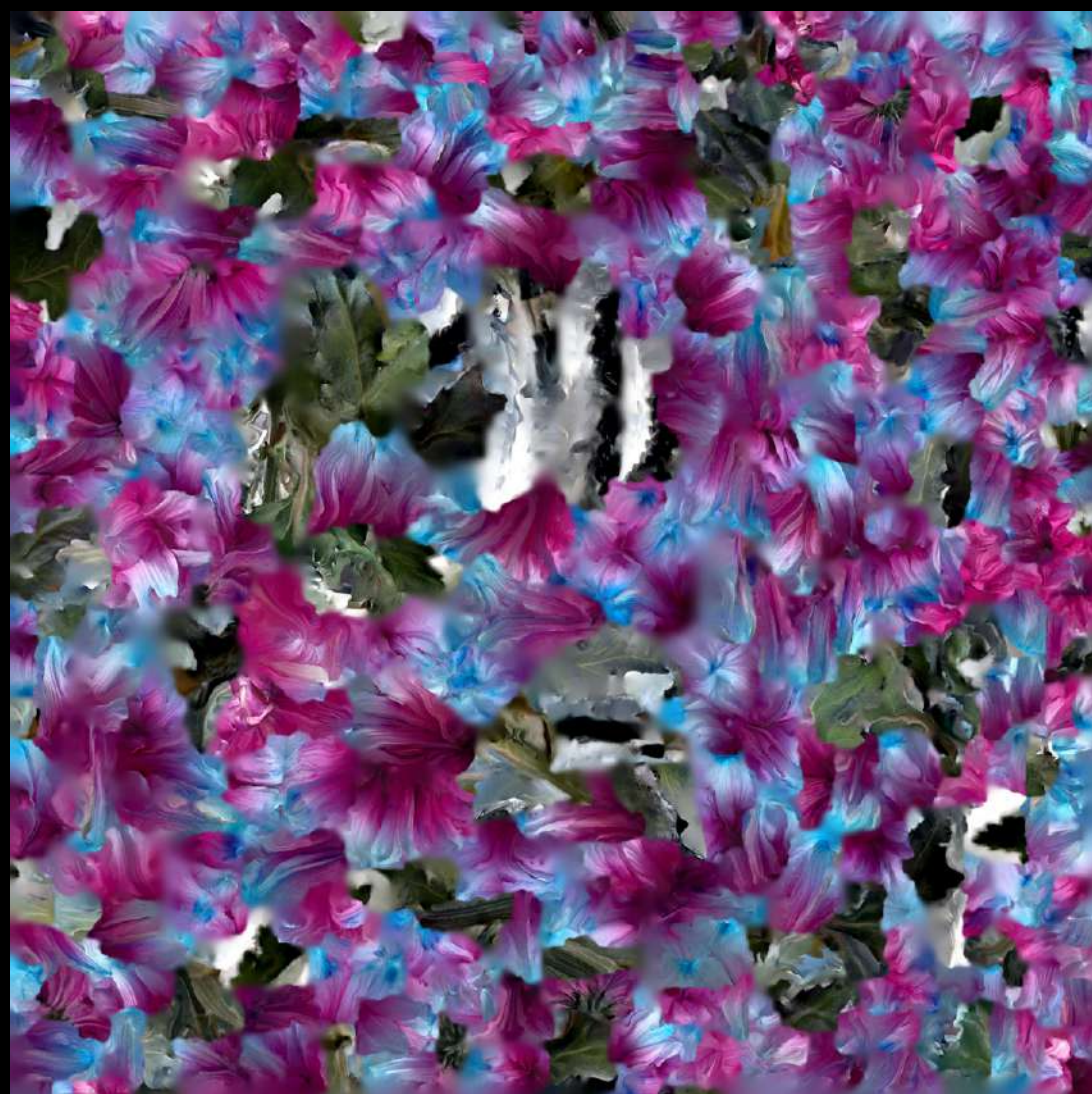


Texture de couleur

Un dahlia holographique



Modèle 3D

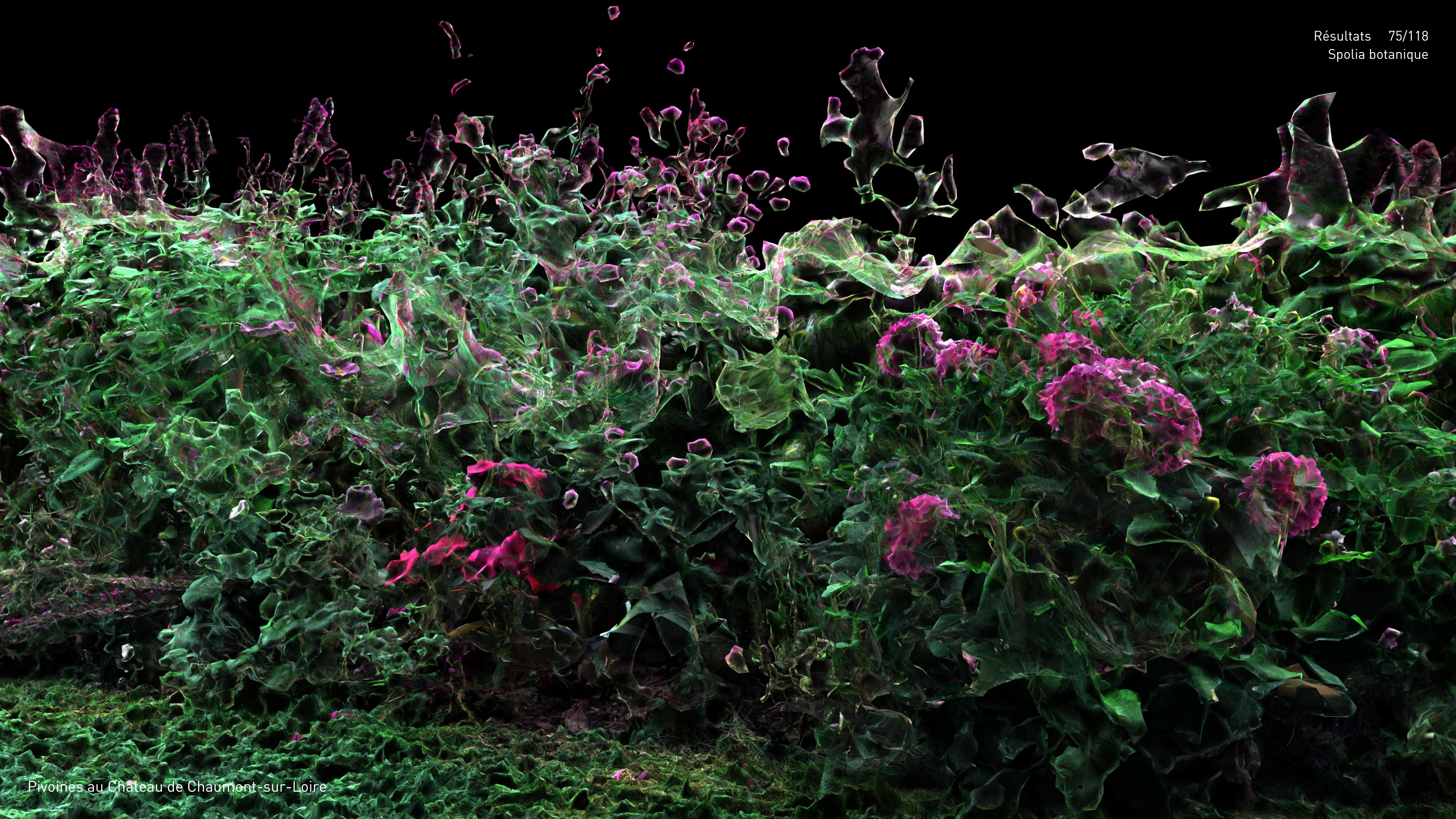


Texture de couleur





Échinacées au Château de Chaumont-sur-Loire



Pivoines au Château de Chaumont-sur-Loire



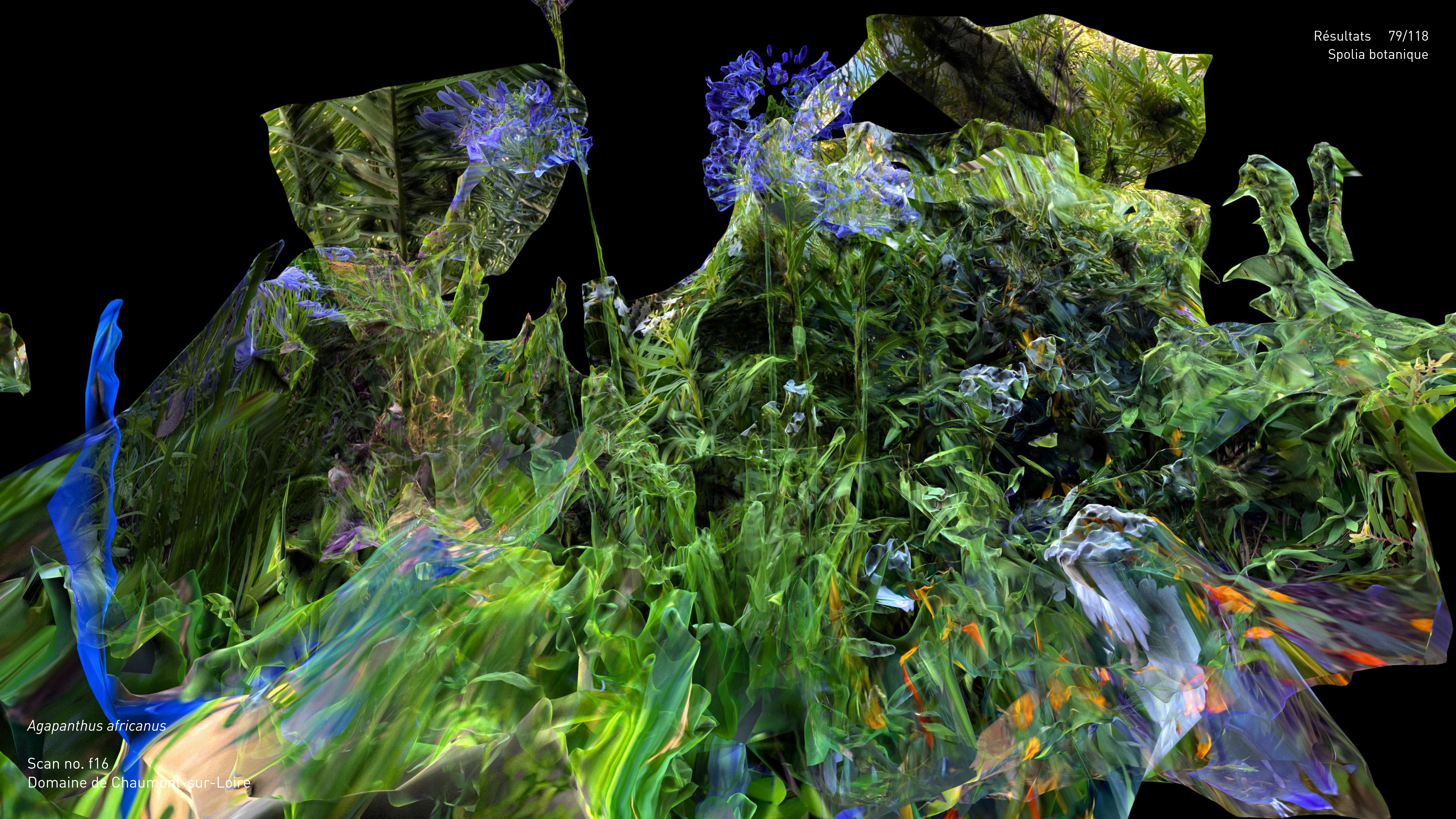


Dahlias, échinacées, géraniums,
camomilles et bugles

Scan no. f01
Domaine de Chaumont-sur-Loire

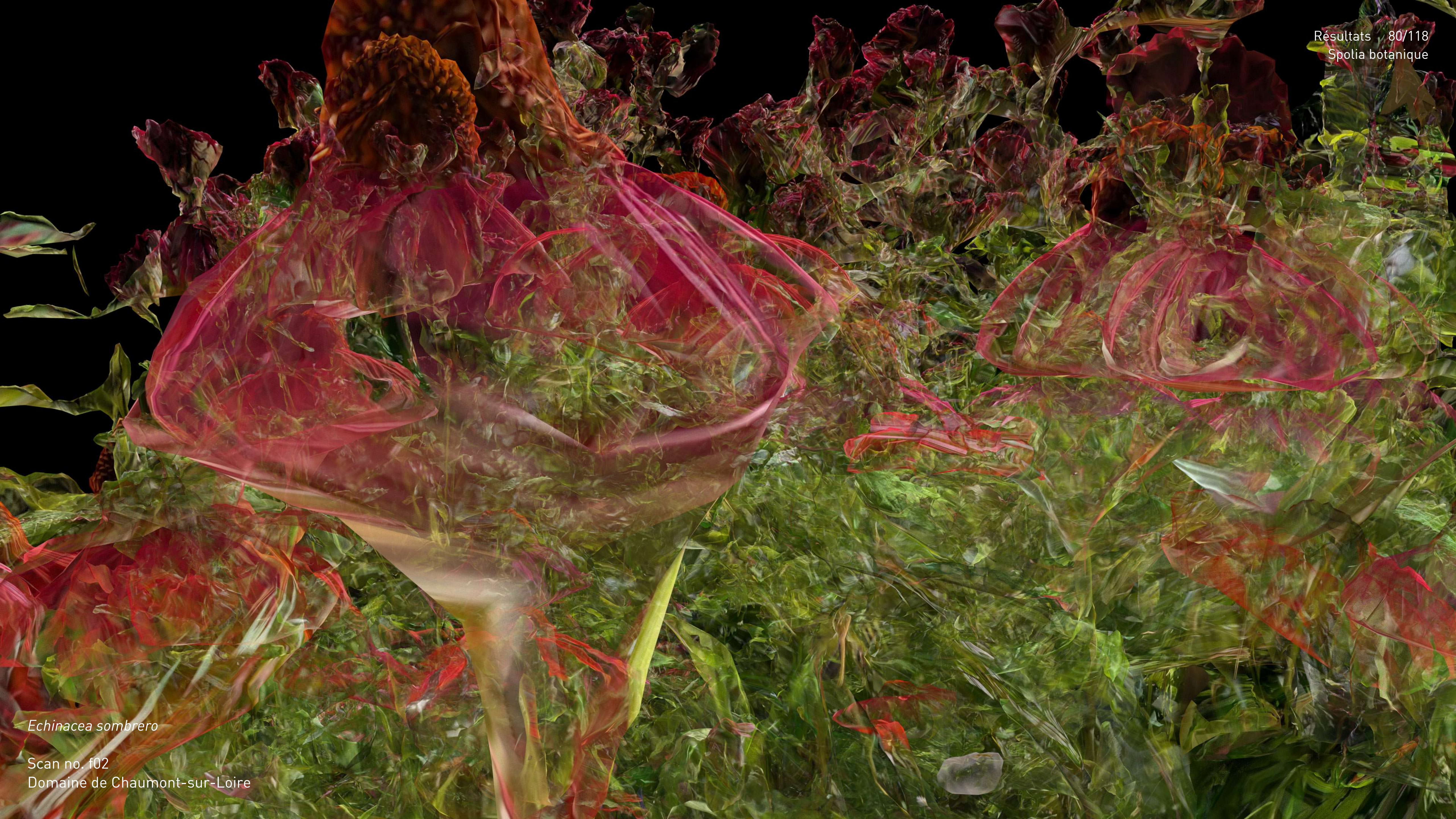


Dahlias et échinacées
Scan no. f02
Domaine de Chaumont-sur-Loire



Agapanthus africanus

Scan no. f16
Domaine de Chaumont-sur-Loire



Echinacea sombrero

Scan no. f02
Domaine de Chaumont-sur-Loire

Delphinium
Echinops ruthenicus

Scan no. f18
Domaine de Chaumont-sur-Loire

Petunia hybrida
Dianthus barbatus

Scan no. f21
Écuries
Domaine de Chaumont-sur-Loire

Fragments d'un jardin en hologramme

Petunia hybrida
Dianthus barbatus
Scan no. 016
Écuries
Domaine de Chaumont-sur-Loire





Modèle 3D



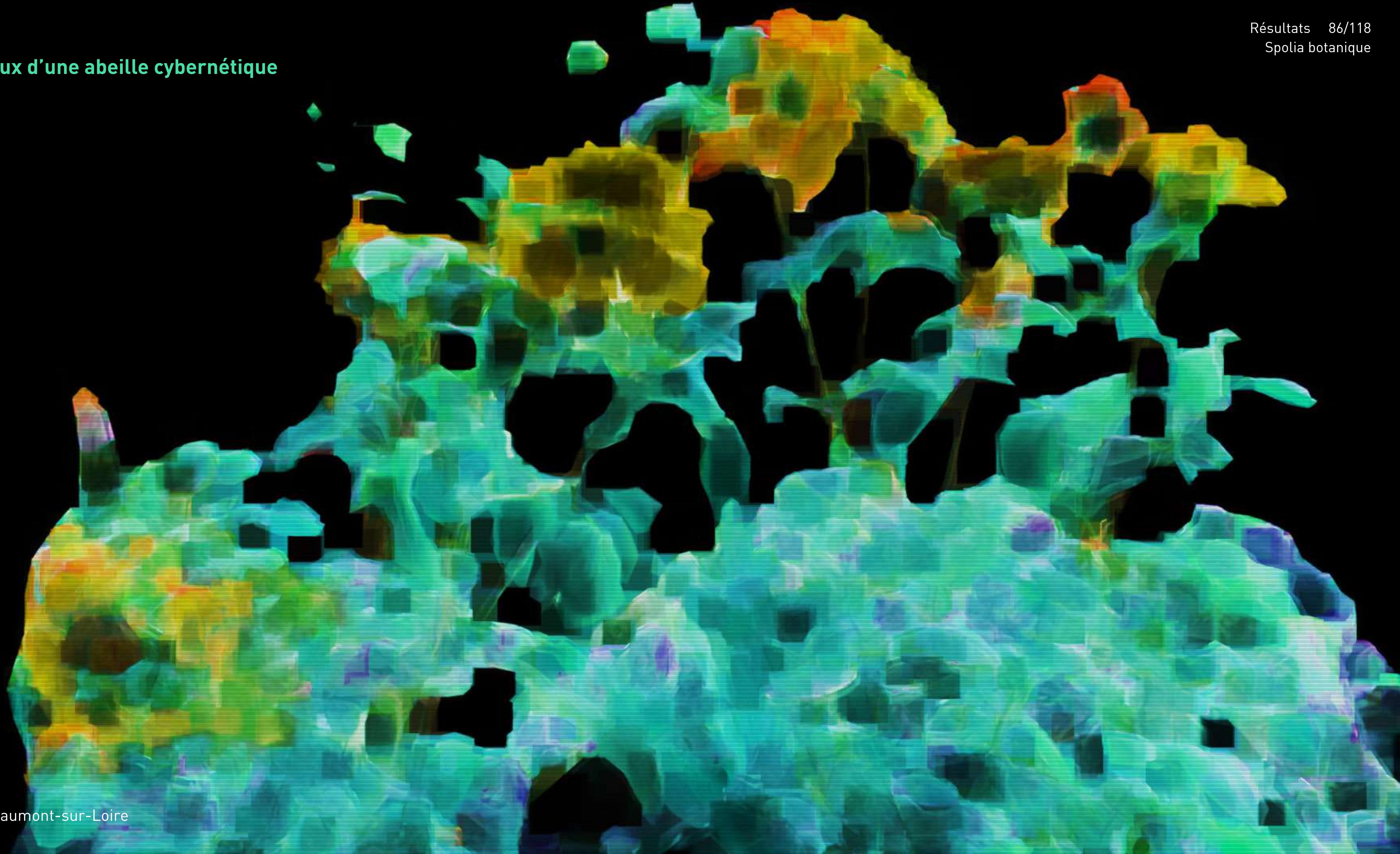
Texture de couleur

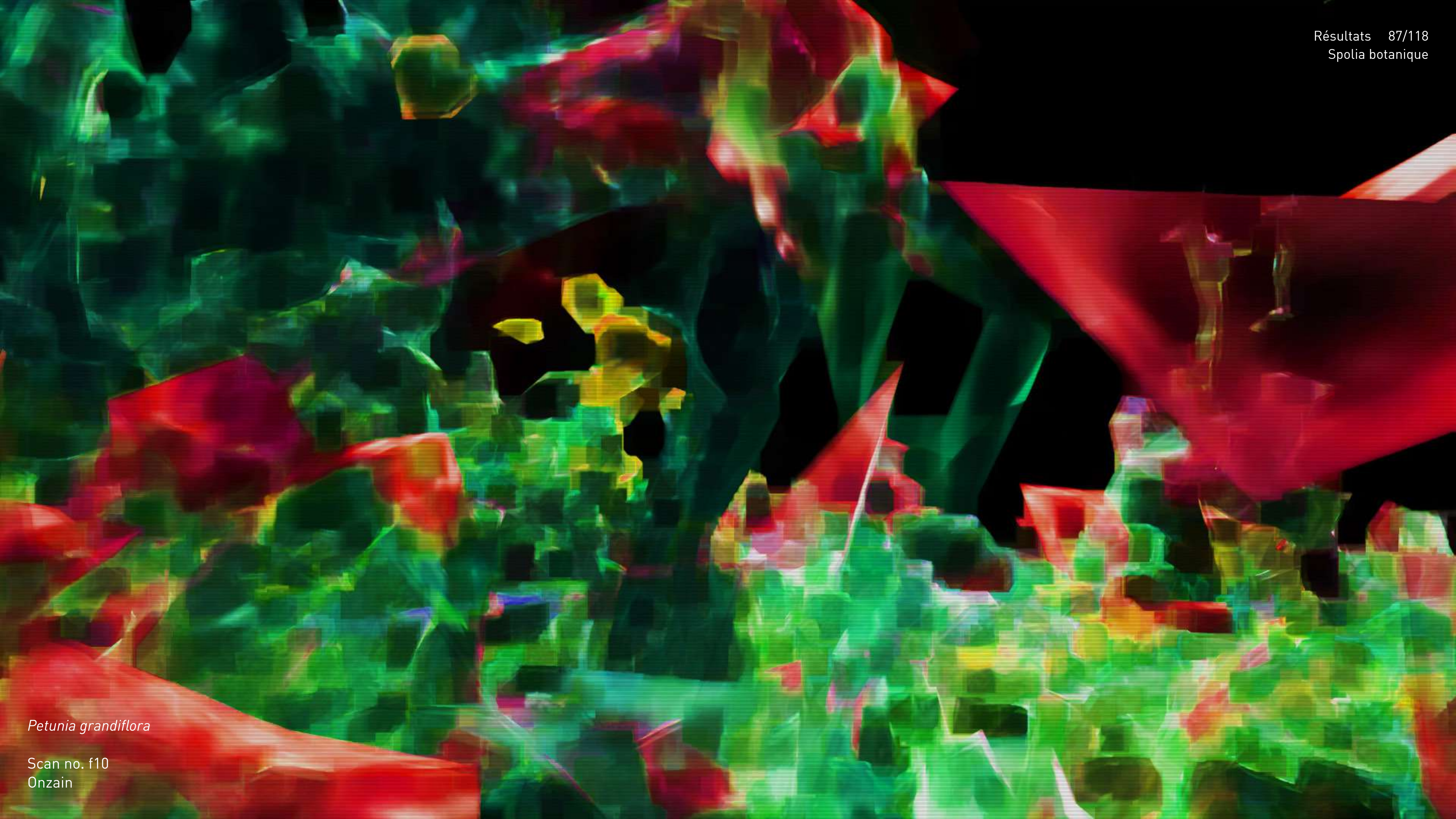
Dans la matrice d'un lys

Dans les yeux d'une abeille cybernétique

Dahlia pinnata

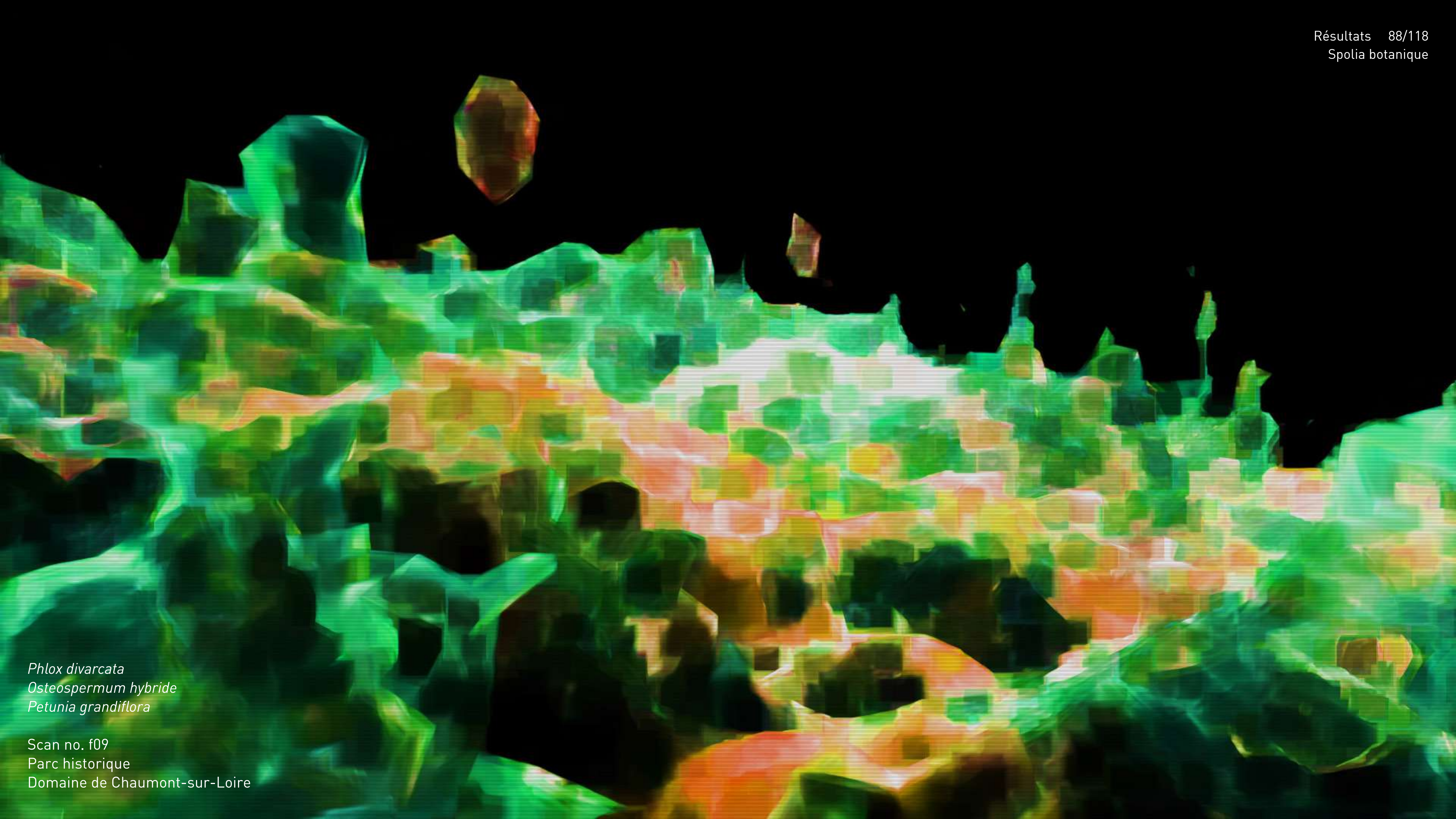
Scan no. s013
Étables
Domaine de Chaumont-sur-Loire





Petunia grandiflora

Scan no. f10
Onzain



Phlox divaricata
Osteospermum hybride
Petunia grandiflora

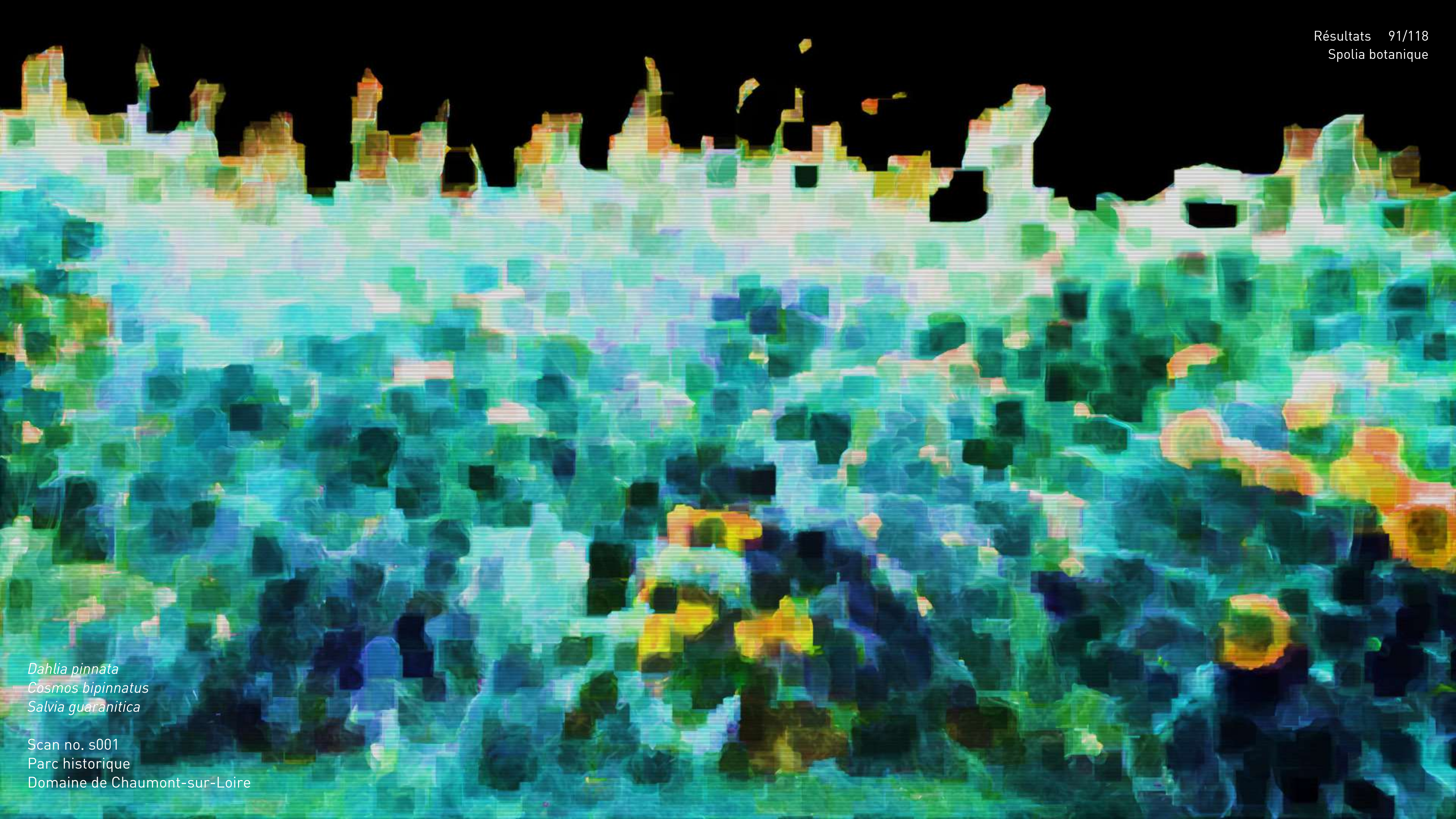
Scan no. f09
Parc historique
Domaine de Chaumont-sur-Loire

Echinacea purpurea
Persicaria longiseta
Cosmos bipinnatus

Scan no. f01
Domaine de Chaumont-sur-Loire

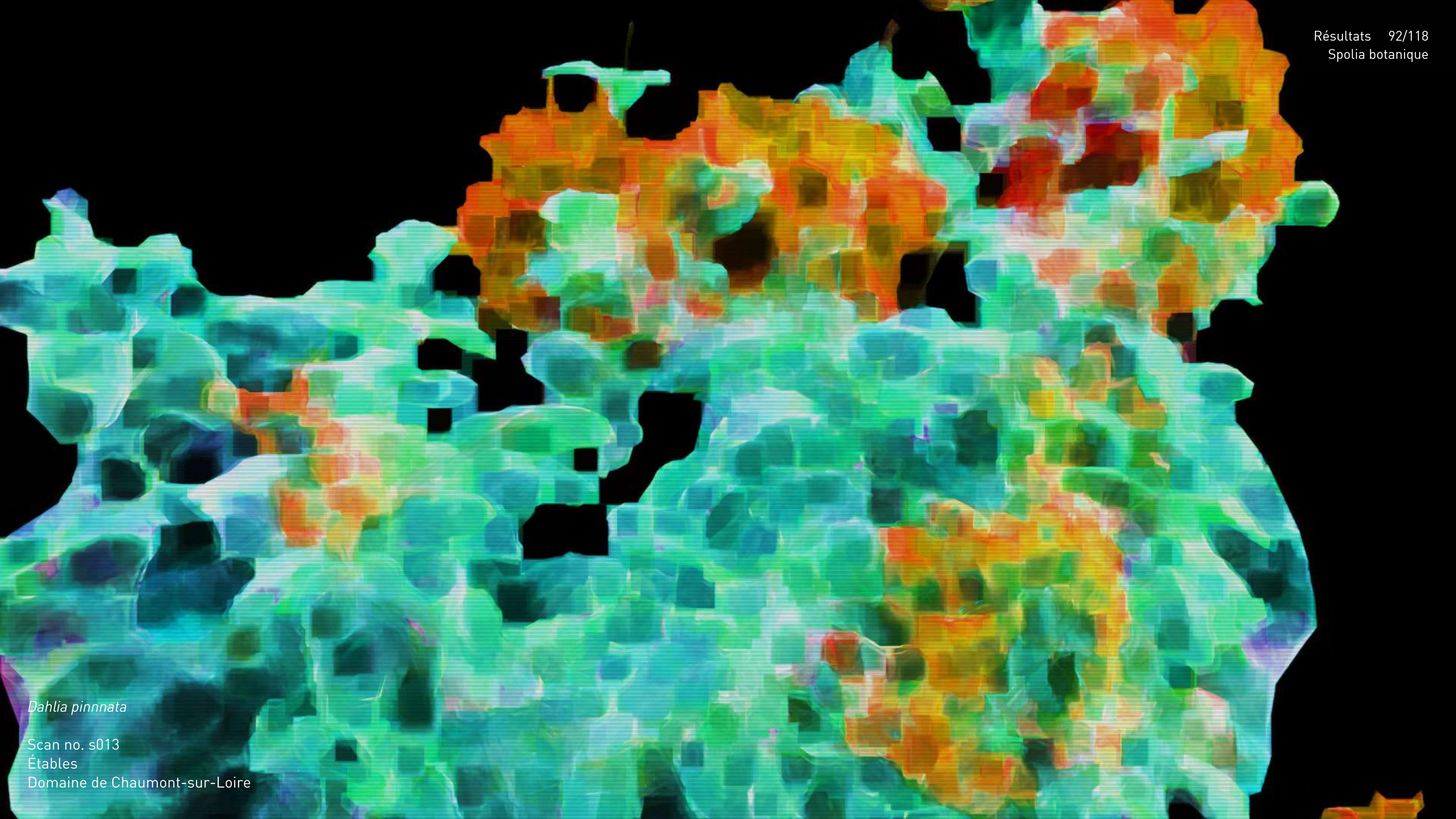
Dianthus baarbatus
Scaevola aemula
Buddleja davidii

Scan no. s016
Étables
Domaine de Chaumont-sur-Loire



Dahlia pinnata
Cosmos bipinnatus
Salvia guaranitica

Scan no. s001
Parc historique
Domaine de Chaumont-sur-Loire



Dahlia pinnata

Scan no. s013
Étables
Domaine de Chaumont-sur-Loire

The background is a complex, abstract composition of layered, translucent textures. It features a mix of vibrant green and deep purple hues, with some areas appearing more saturated than others. The textures resemble crumpled paper, liquid splashes, or perhaps digital brushstrokes, creating a sense of movement and depth. The overall effect is a rich, multi-colored tapestry that serves as a backdrop for the text.

Bilan final

Évaluation des objectifs

Nous avons réussi à atteindre tous les objectifs définis lors de la candidature.
En ce qui concerne la recherche, nous avons étudié :

- les différentes manières d'intégrer la réalité augmentée dans une méthode de projet, dans un processus de création familier aux architectes
- les potentiels et les difficultés associés à une telle approche
- les différents types d'augmentation de l'espace
- les influences sur la perception de l'espace

En ce qui concerne la création, nous avons développé :

- une application comme extension du Festival
- une application d'immersion botanique
- une application ludique de design immersif

Nous avons également préparé :

- une animation présentant le projet
- une animation d'immersion comme pièce d'exposition.

Analyse des caractéristiques replicables

Nous avons développé deux modèles d'application dans le cadre du projet :

- le musée immersif
- le design immersif

Les deux modèles reposent sur une même série de composants de base :

- Écran de présentation
- Page d'accueil
- Page « à propos »
- Liste
- Fiche de détails

Ces éléments de base sont combinés avec différents composants 3D pour offrir deux expériences distinctes de réalité augmentée. Par conséquent, ils ouvrent la voie à deux horizons différents de réplique, comme le suggèrent déjà leurs noms.

Musée immersif

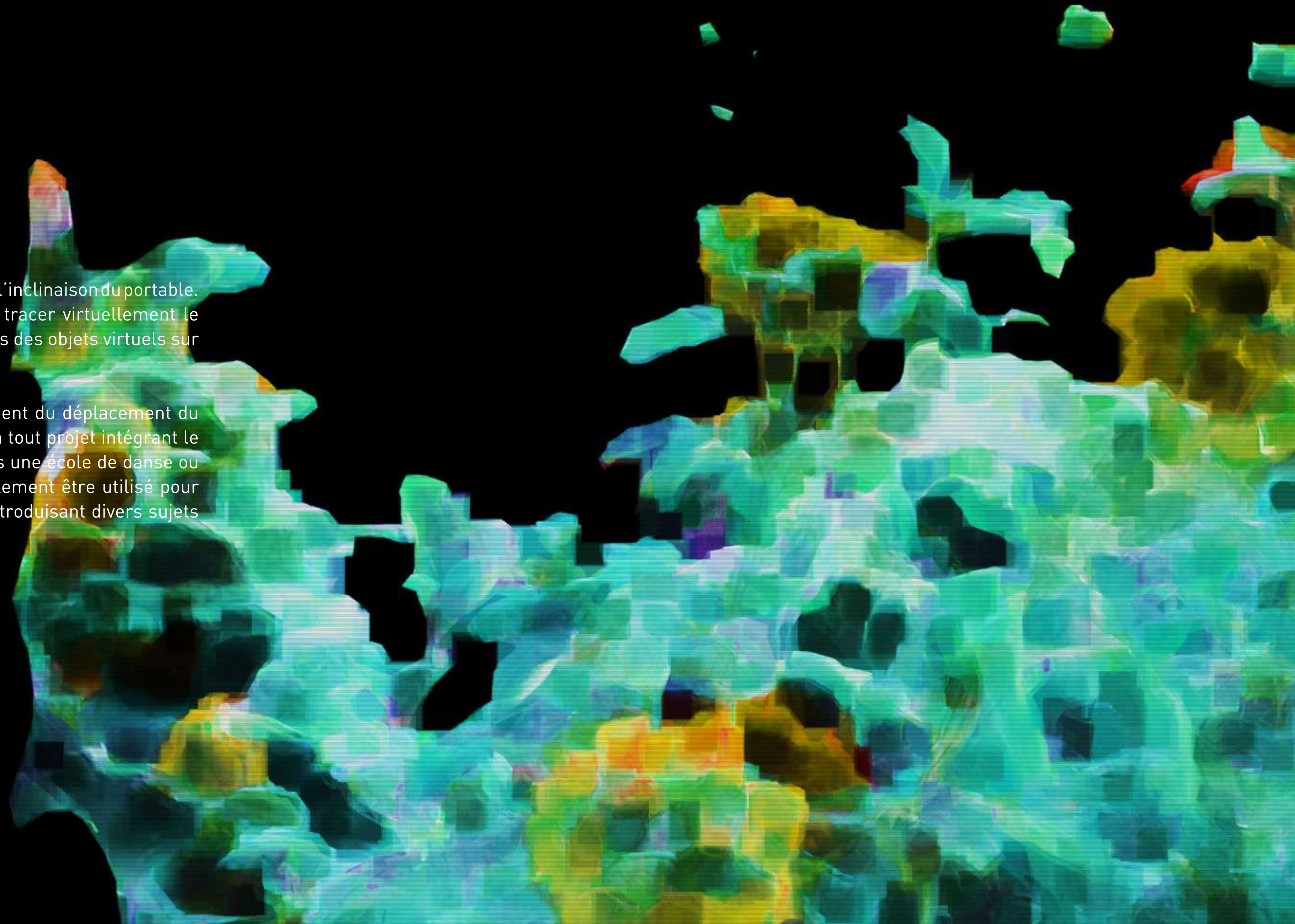
Ce modèle permet d'explorer des lieux ou des objets selon deux modes : en 3D classique et en réalité augmentée. Il offre ainsi une vue 3D interactive et une vue en réalité augmentée.

Idéal pour la conception des expositions, de musées immersifs ou des archives virtuelles pour tout type de donnée 3D, il peut également servir d'outil de recherche pour les chercheurs en humanités numériques. Par exemple, un chercheur français travaillant sur les vestiges de Pompéi en Italie pourrait numériser en 3D ses objets d'études plutôt que de les photographier. De retour en France, grâce à cette application, il pourrait les étudier en détail en 3D et de manière immersive, comme s'il avait rapporté son objet d'étude avec lui. Ce modèle, développé pour l'application Festum virtual, a déjà été réutilisé pour l'application Spolia botanique.

Design immersif

Ce modèle permet de capturer la position et l'inclinaison du portable. Il calcule ensuite ces changements pour tracer virtuellement le mouvement, puis place en trois dimensions des objets virtuels sur cette trajectoire.

Fondamentalement axé sur l'enregistrement du déplacement du corps, ce modèle pourrait servir de base à tout projet intégrant le mouvement et les gestes, que ce soit dans une école de danse ou une expérience artistique. Il pourrait également être utilisé pour une application pédagogique et ludique introduisant divers sujets aux enfants.

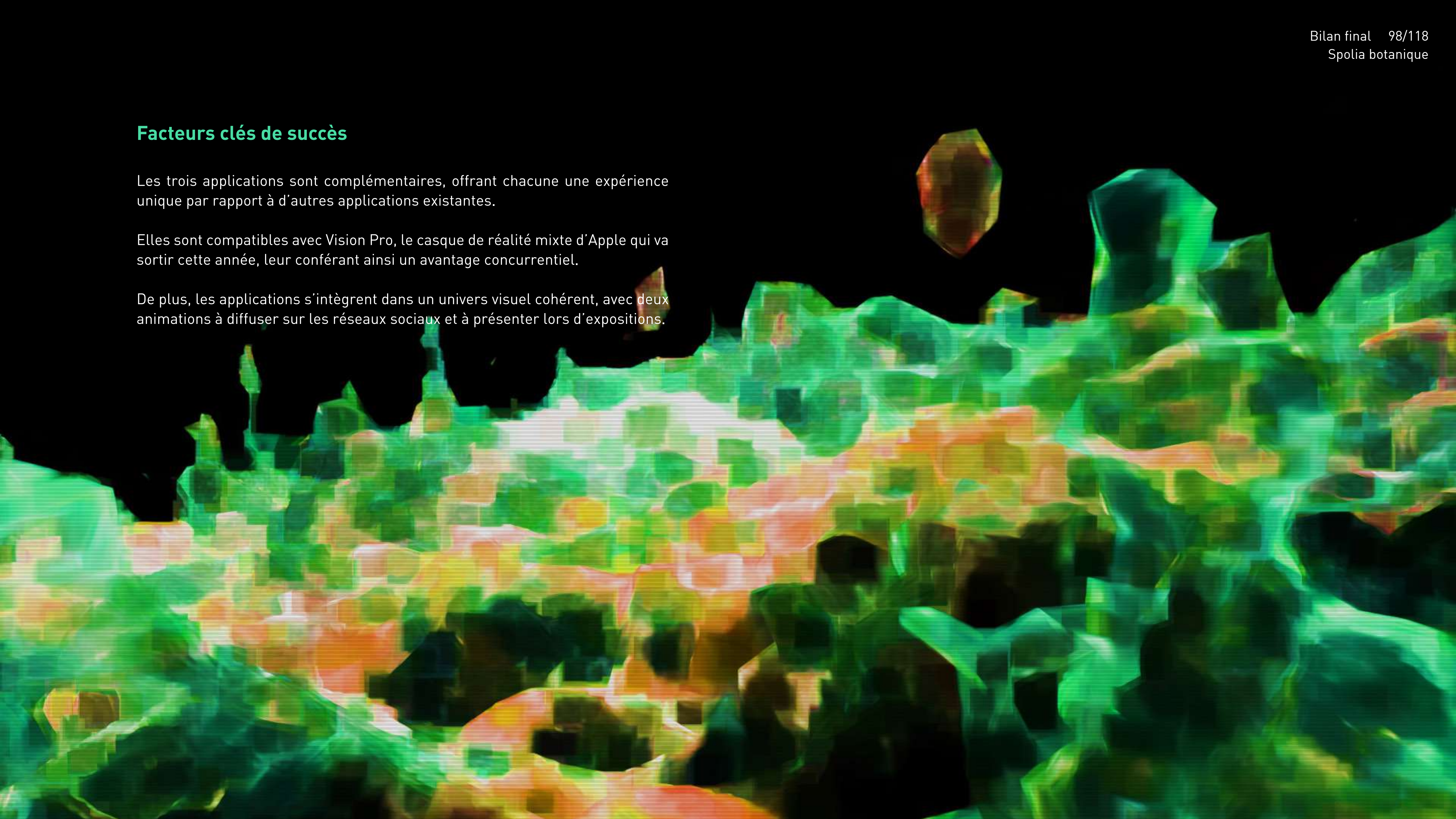


Facteurs clés de succès

Les trois applications sont complémentaires, offrant chacune une expérience unique par rapport à d'autres applications existantes.

Elles sont compatibles avec Vision Pro, le casque de réalité mixte d'Apple qui va sortir cette année, leur conférant ainsi un avantage concurrentiel.

De plus, les applications s'intègrent dans un univers visuel cohérent, avec deux animations à diffuser sur les réseaux sociaux et à présenter lors d'expositions.

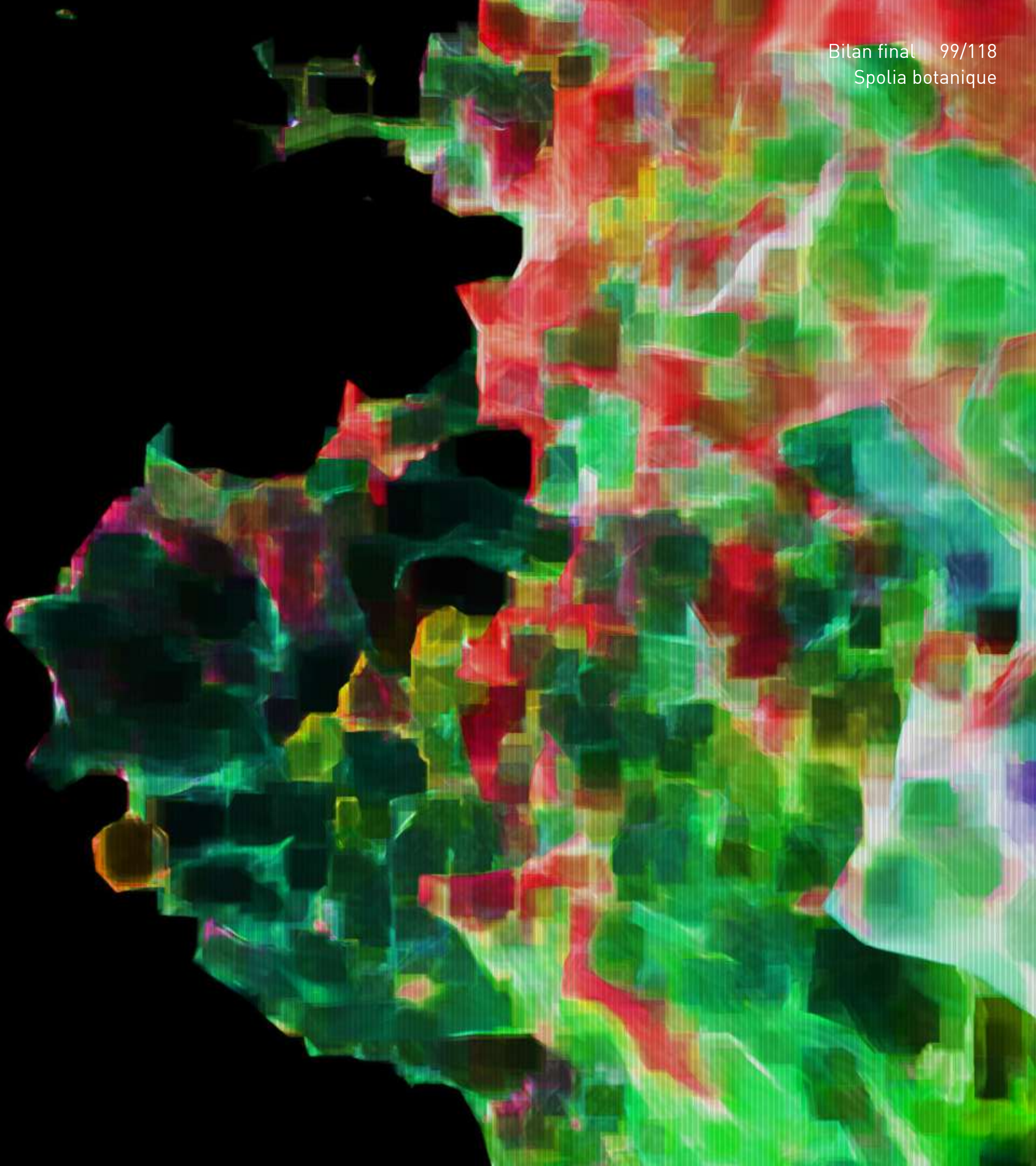


Freins au développement

Lien avec l'enseignement

Au départ, nous avons envisagé de mener des expériences avec des groupes d'étudiants pendant un semestre, voire lors d'un atelier ponctuel. Cette collaboration collective avec les étudiants était cruciale pour nous. Ayant l'ENSA Paris-Belleville comme partenaire, nous aurions souhaité instaurer un enseignement en option ou intensif, mais cela n'a pas été possible en raison de contraintes administratives. En réalité, même si nous avons pu lancer un cours, l'année pédagogique a été perturbée par les grèves étudiantes.

En revanche, nous avons accueilli deux étudiantes en architecture en tant que stagiaires. Grâce à elles, nous avons pu expérimenter différentes méthodes, approches et outils dans le domaine du design immersif. Ces expériences ont été extrêmement bénéfiques pour le développement du projet et ont également permis de mieux comprendre le potentiel et les difficultés liés à l'intégration de la réalité augmentée dans la conception architecturale.

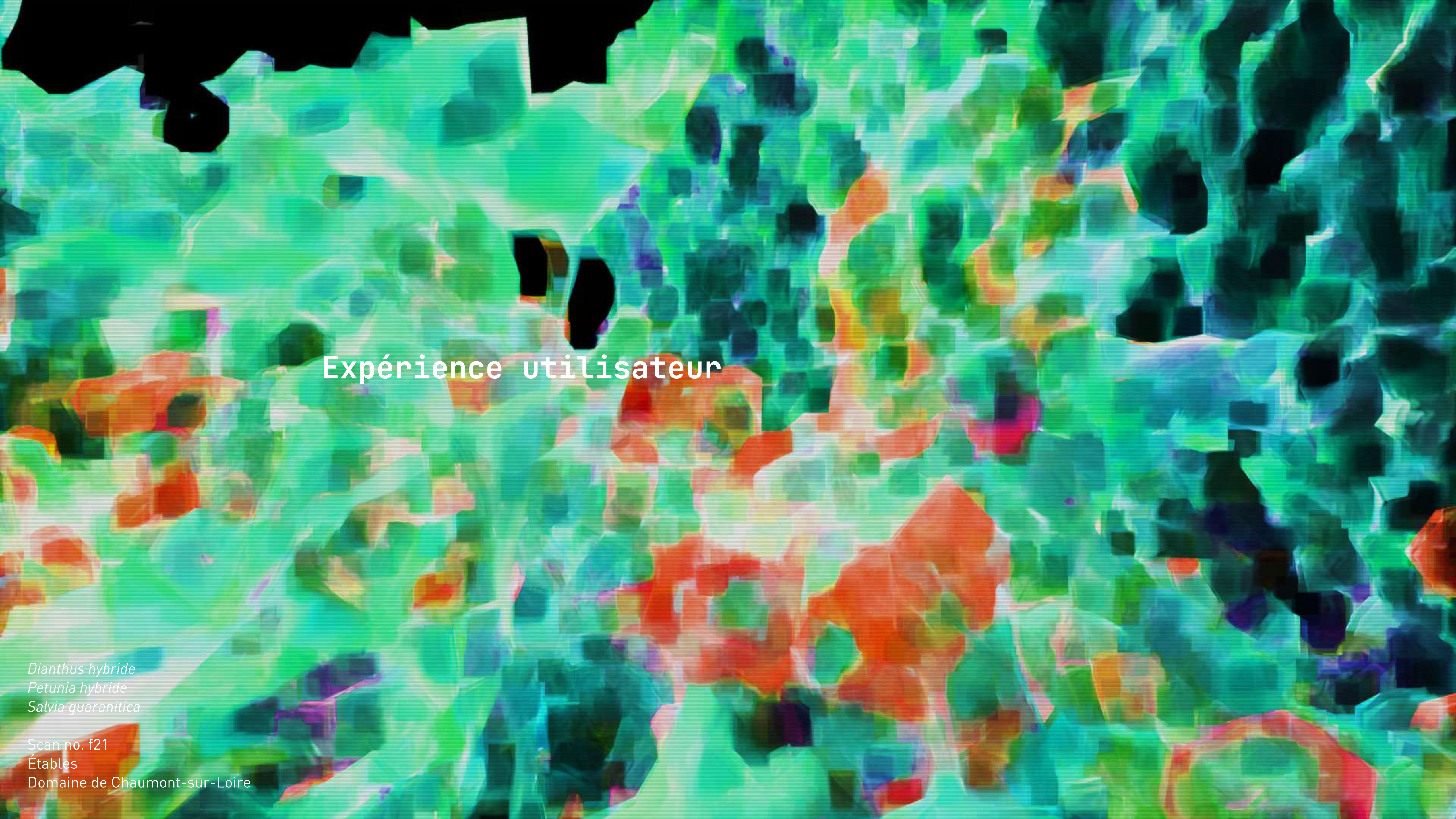


Limitations en développement

Nous avons réussi à atteindre l'ensemble des objectifs précisés lors de la candidature. Cependant, au moment du lancement du projet, nous avons envisagé d'aller plus loin. Nous souhaitions intégrer dans l'application une interface cartographique regroupant les transformations botaniques des rues imaginées par les habitants, une sorte de communication botanique se déroulant dans l'espace augmenté. Malheureusement, cette fonctionnalité n'a pu être réalisée en raison de difficultés techniques liées à la compatibilité entre les outils de développement.

Perspectives

- > Recherche de partenariat et de financement pour aller plus loin dans le développement (notamment pour le jeu cartographique d'échange)
- > Valorisation doctorale
- > Intégration dans l'enseignement en architecture
- > Collaborations avec l'École nationale supérieure de paysage, les écoles d'horticulture (comme l'École du Breuil et l'Institut national d'horticulture et de paysage), les écoles d'architecture et de paysagisme (comme les ENSAP Bordeaux et Lille) ou les écoles d'ingénieur paysagiste (l'École de la nature et du paysage de l'INSA et l'École supérieure d'architecture des Jardins)
- > Diffusion sur les plateformes, réseaux sociaux et revues numériques
- > Participation à des concours
- > Possibilité d'expositions (à étudier)

The background is an abstract composition of various organic shapes in shades of green, blue, and orange, creating a textured, almost painterly effect. The colors are layered and blended, giving it a sense of depth and movement.

Expérience utilisateur

Dianthus hybride
Petunia hybride
Salvia guaranitica

Scan no. f21
Étables
Domaine de Chaumont-sur-Loire



Capture d'écran d'un étudiant qui a placé une fleur virtuelle devant un groupe d'étudiants observant d'autres fleurs sur la tablette, créant et fusionnant ainsi des espaces fragmentaires.

Expérience utilisateur

Nous avons mené notre étude sur l'expérience utilisateur avec un groupe de 14 étudiants en master de l'ENSA Paris-Belleville le 18 mars et le 10 juin 2024. Ces étudiants, âgés de 21 à 24 ans, comprenaient à la fois des hommes et des femmes.

L'objectif principal de notre expérimentation était d'explorer le potentiel du « design immersif » pour les étudiants en architecture et d'évaluer l'efficacité de notre application, Floral Tracer, dans la facilitation de cette expérience. Nous avons cherché à déterminer si notre outil pouvait réellement améliorer et enrichir leur processus de conception.

Bien que notre focus ait été principalement sur Floral Tracer, les deux autres applications, Spolia Botanique et Festum Virtual, ont aussi été employées et évaluées afin de mesurer la réaction des étudiants et leur adaptation, tant sur le plan mental que physique, aux environnements augmentés où les espaces physiques et virtuels se confondent.

Implication des utilisateurs

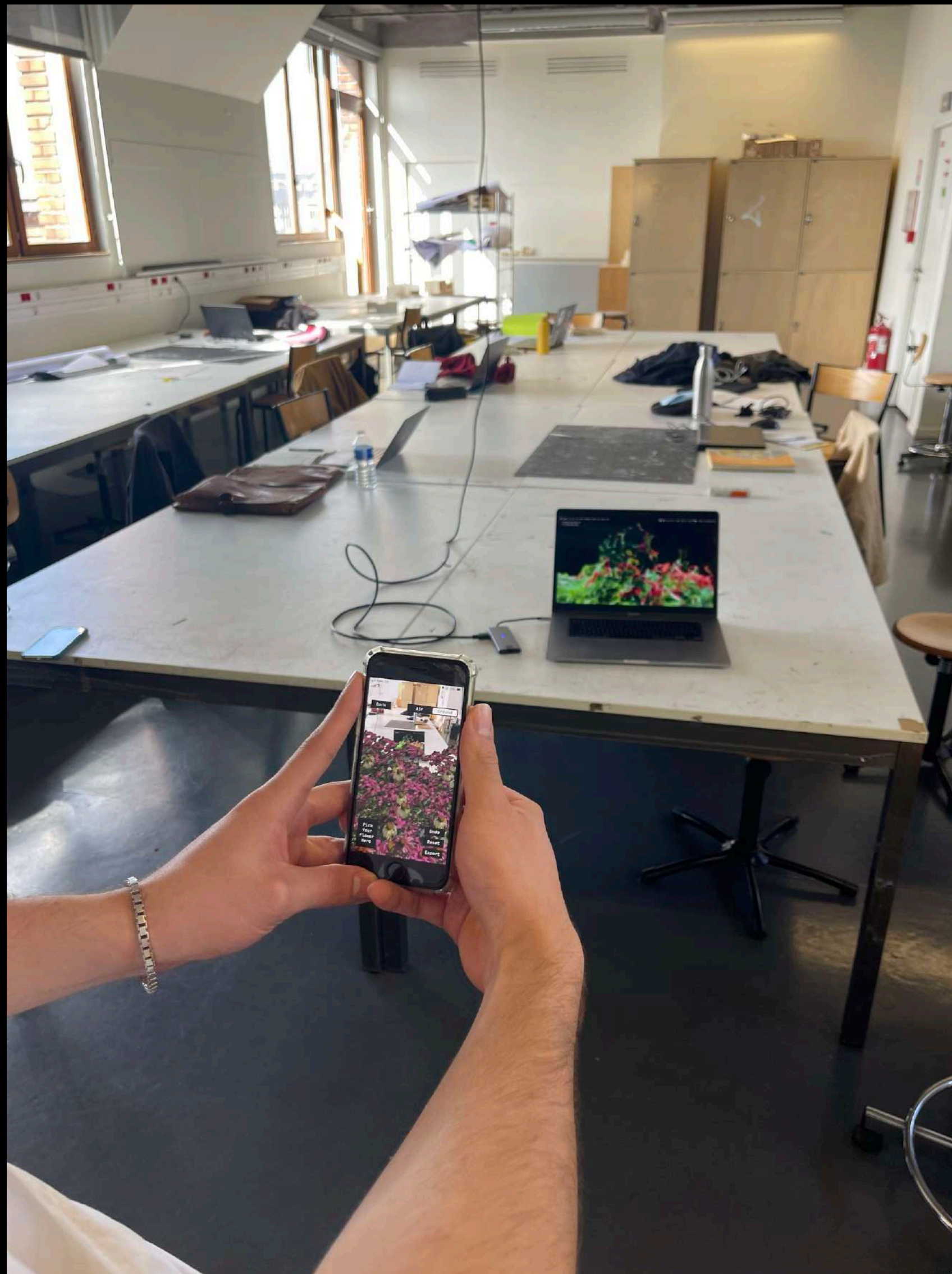
Les étudiants étaient pleinement engagés dès le début de l'expérience, montrant rapidement une forte implication. Les applications ont démontré leur capacité à captiver l'attention des utilisateurs. L'interface des trois applications s'est avérée **efficace et intuitive**, permettant aux étudiants de **naviguer aisément** entre les différentes vues (pages/scènes). Les instructions d'utilisation, affichées au début de chaque session, ont facilité le déroulement des expériences sans nécessiter notre intervention.

Ils ont perçu le milieu hybride de conception, tissé par notre application entre l'espace physique et l'espace virtuel, comme un **environnement naturel incitant à l'exploration et à la curiosité**. Pour la majorité des étudiants, la fusion des espaces physique et virtuel leur semblait tout à fait **naturelle**, à un degré qui nous a même surpris. Auparavant, nous avons réalisé des tests avec des personnes de plus de 50 ans, où la tendance était de percevoir l'environnement augmenté sur l'écran du téléphone comme une image traditionnelle. Il était souvent difficile pour eux de le voir comme un objet tridimensionnel à travers le téléphone, qui devenait une fenêtre vers un nouveau type de lieu. Initialement, ils ne se déplaçaient pas facilement dans l'espace et restaient plutôt statiques, nécessitant simplement une période d'adaptation plus longue.

Les étudiants ont exprimé que les jardins virtuels étaient **perçus comme tangibles et physiques**, comparables aux vrais jardins. Ils s'arrêtaient parfois brusquement pour éviter de marcher sur une fleur virtuelle ou de heurter un arbre virtuel. Parfois, ils se cognaient contre une table réelle en essayant de dessiner un jardin virtuel spécifique. Pour eux, ces environnements étaient vécus et expérimentés, en général, comme étant réels.



Les étudiants en train de créer des jardins virtuels dans la salle de classe.



Un étudiant créant un jardin d'échinacée
autour des tables dans Floral Tracer

Pérformance technique

Nos applications ont fonctionné **sans aucun bug** ni dysfonctionnement. Cependant, pour améliorer la performance, nous avons retiré certaines fonctions. Par exemple, notre application superpose les modèles 3D sur l'alimentation de la caméra, mais une main ou un pied qui devrait apparaître devant le modèle n'apparaît pas. Cela réduit l'impact de l'expérience. Un étudiant a remarqué que, lorsqu'il marchait sur des plantes, il ne voyait pas ses pieds sur le sol virtuel. C'est une fonction que nous pourrions facilement intégrer, mais les modèles devraient être optimisés à cet effet.

L'expérience a été réalisée dans une salle de classe de l'école. Les applications ont pu parfaitement reconnaître l'environnement physique et en faire une copie virtuelle. Les modèles de jardins virtuels étaient **précisément intégrés** dans la salle de classe. Nous n'avons pas rencontré de glissement de modèles, ce qui arrive parfois dans la réalité augmentée en raison d'une mauvaise détection de l'environnement physique. Nos applications ont su offrir une **détection de scène parfaite** et garantir une **expérience de conception intuitive et continue**.

Impact sur le processus de conception

Chaque étudiant possède naturellement ses outils de prédilection ; certains préfèrent le papier et le crayon, tandis que d'autres favorisent les logiciels de conception. Ces deux groupes sont souvent perçus comme opposés en termes d'approches, de styles et des écoles de pensée qu'ils représentent. Toutefois, en utilisant notre application, tous les étudiants, indépendamment de leurs outils favoris antérieurs, se sont montrés pleinement engagés et à l'aise. Ils ont rapporté que, tout comme avec le papier et le crayon, leurs mains étaient directement impliquées dans le processus de conception, mais avec l'avantage supplémentaire de créer directement dans un environnement 3D et non seulement des images 2D.

Cette capacité à **générer des environnements 3D du bout des doigts**, en utilisant divers gestes corporels, a été cruciale pour l'attrait de l'application auprès d'un groupe diversifié d'étudiants. Ils ont indiqué que cette approche permettait de transcender l'opposition traditionnelle entre les adeptes du numérique et ceux de la méthode classique. **Lorsque l'image virtuelle se spatiale pour devenir tangible**, l'application réussissait à fusionner les paradigmes de la conception artisanale et numérique, réconciliant ainsi la main et le pixel, le rapport direct et manuel avec l'univers virtuel.



Un étudiant qui dessine une tour florale avec ses gestes et le jardin résultant



Un facteur clé de l'intérêt des étudiants pour l'application résidait dans son intégration du **mouvement corporel**, transformant un processus de conception traditionnellement passif en une **expérience kinesthésique ludique**. Au lieu de rester assis à un bureau, à dessiner sur papier ou sur écran, les étudiants marchaient, s'étiraient, se penchaient et grimpaient autour de la salle de classe. Cette activité leur a permis de développer une conscience accrue de leur environnement immédiat, questionnant constamment ses limites et ses potentiels. Alors que leurs mouvements étaient instantanément convertis en jardins virtuels intégrés à l'environnement physique, ils ont aussi développé une perception de leur **corps comme un agent actif dans la création** d'espace.

Aspects innovants

Les étudiants se sont rapidement adaptés aux environnements hybrides et ont commencé à réaliser des conceptions qui exploitent les caractéristiques uniques du design immersif, le distinguant de la modélisation 3D conventionnelle sur ordinateur.

En effectuant leurs conceptions directement sur l'image captée par la caméra, les étudiants ont utilisé comme toile, non pas la surface abstraite et vierge d'une page, mais des lieux animés de personnes et d'événements. Ainsi, leurs créations ont montré une **connexion plus forte avec les activités** se déroulant dans la salle de classe ou avec les petits détails du mobilier et des murs.

Les créations des étudiants se sont distinguées par une certaine **plasticité volumétrique**. Les jardins n'étaient pas conçus et générés en 2D, plan par plan, mais étaient le résultat d'une créativité **instantanément spatiale et en 3D**. Ils investissaient non seulement les plans plats de la salle de classe, tels que le sol et les murs, mais aussi le volume complet de la salle. L'air, laissé entre les murs et que le plan de l'architecte laissait blanc sur le papier, devenait maintenant un lieu pouvant accueillir toutes sortes de formes et de couleurs. Il devenait le médium direct du design, plutôt qu'un espace conséquent et non considéré, supposé être vide. Les jardins n'étaient manifestement pas dérivés de plans et de coupes, mais plutôt de profondeur et de hauteur, de l'épaisseur de l'espace, du **paradigme spatial que l'image traversait**.

Une arche florale dessinée par un étudiant
autour de Mete Kutlu pendant qu'il expliquait l'exercice.





Jardins suspendus de Belleville

Les conceptions ont également montré que l'espace virtuel avec lequel nous étendons notre espace physique ne doit pas nécessairement être newtonien ou euclidien. C'est un espace où les lois traditionnelles de la physique, telles que la gravité, peuvent être abandonnées. Ainsi, une réalité fantastique et inhabituelle devient partie intégrante de notre quotidien, de manière tangible et interactive. La perception conventionnelle de l'espace et du temps devient fondamentalement invalide, même dans les activités quotidiennes les plus banales. L'application a montré que ce nouveau paradigme spatial nécessite de nouveaux outils qui préparent les étudiants à un tel changement de paradigme, pour concevoir l'espace de manière plus fluide et malléable.

Valeur éducative

Débat : Notre test d'expérience utilisateur nous a montré que notre application n'est pas seulement un outil d'aide à la conception, mais aide également à initier des débats très créatifs sur l'architecture à l'ère de la crise climatique et de l'intelligence artificielle. L'expérience a finalement poussé les étudiants à questionner de nombreux sujets liés à l'enseignement de l'architecture et au processus de conception. Tout en prouvant leur potentiel en tant qu'outils de conception, nos applications ont ouvert aux étudiants la possibilité de repenser l'architecture en relation avec la technologie et la nature ; de reconsidérer la place du corps et des sens dans l'espace ; et de dépasser les oppositions classiques telles que virtuel contre physique, nature contre technologie, ou corps contre architecture.

La discussion finale a abordé un large éventail de sujets en lien avec la conception architecturale, tels que les **approches sensibles et chromatiques**, les **philosophies des plantes**, le nouveau matérialisme, le post-médiévalisme moderne et, plus généralement, les « **artisanats numériques** ». Les étudiants ont aussi examiné les différents processus de conception et méthodes d'enseignement pratiqués dans diverses écoles en France et à l'étranger, enrichissant le débat de leurs expériences Erasmus et de leurs connaissances sur d'autres écoles d'art, de design et de mode. Finalement, l'expérience a conduit à une **discussion interdisciplinaire, internationale et collaborative** sur l'architecture contemporaine.





Une étudiante qui explore une forêt immersive dans Spolia botanique

Approches expérimentales : Les étudiants n'avaient jamais entendu parler de la notion de « conception immersive » auparavant, et n'avaient jamais eu d'expérience avec une telle méthode. Les applications que nous avons proposées étaient fondamentalement différentes de tous les outils qu'ils avaient utilisés précédemment à l'ENSA Paris-Belleville. En conséquence, l'expérience a eu un effet général émancipateur et inspirant sur les étudiants. Ils ont exprimé que l'application proposait une nouvelle perspective créative pour regarder l'espace architectural et le corps humain, les invitant ainsi à imaginer de nouvelles compositions et sensations en architecture.

Au-delà du processus de conception immersive spécifique que nous avons proposé, l'expérience les a également encouragés à élaborer des méthodes plus personnalisées et à réapproprier les outils de conception conventionnels de manière expérimentale pour développer des projets architecturaux innovants.

Conception kinesthésique : Les étudiants ont révélé un fort intérêt pour le processus de conception actif et kinesthésique. En fait, nous observons un intérêt général croissant de nos étudiants pour les pratiques impliquant un travail manuel et une interaction humaine, comme les pratiques artisanales de la menuiserie et de la maçonnerie, ou dans des lieux de création tels que les ateliers, les chantiers, les workshops et les fablabs. Notre application semblait répondre à de tels besoins.

Export des modèles : Les étudiants ont également demandé s'il était possible d'exporter les modèles vers un ordinateur pour y travailler. Cette fonction est déjà intégrée dans l'application, et les étudiants ont trouvé très utile de pouvoir intégrer cet outil innovant dans des flux de travail plus conventionnels.



Tableau d’évaluation

Ces applications ont été évaluées par 14 étudiants en architecture sur une échelle de 1 à 5, avec une répartition égale entre les hommes et les femmes, et entre les étudiants de Master 1 et de Master 2.

Paramètre	Description	Floral Tracer	Spolia Botanique	Festum Virtual
Facilité d'utilisation	Facilité avec laquelle les utilisateurs peuvent naviguer dans l'application	4.0	4.5	4.5
Fonctionnalité	Gamme et efficacité des fonctionnalités de l'application	4.8	4.2	4.5
Interface utilisateur	Attrait visuel et mise en page de l'application	5.0	5.0	5.0
Performance	Vitesse et réactivité de l'application	4.2	4.8	5.0
Stabilité	Fréquence des crashes ou des bugs	4.0	5.0	5.0
Support client	Disponibilité et qualité du support pour les utilisateurs	5.0	5.0	5.0
Qualité visuelle	Clarté et réalisme des plantes et jardins scannés en 3D	5.0	5.0	5.0
Photoréalisme des numérisations	Degré de réalisme des modèles 3D scannés	5.0	5.0	5.0
Expérience immersive	Niveau d'immersion fourni par l'expérience AR	4.8	4.8	4.5
Réactivité de l'interaction	Réactivité de l'application aux interactions des utilisateurs	4.5	5.0	5.0
Intégration des mouvements du corps	Efficacité du suivi et de l'intégration des mouvements du corps	4.4	5.0	5.0
Retour en temps réel	Qualité du retour en temps réel aux actions des utilisateurs	5.0	5.0	5.0

Paramètre	Description	Floral Tracer	Spolia Botanique	Festum Virtual
Courbe d'apprentissage	Niveau de difficulté pour les nouveaux utilisateurs à apprendre et à utiliser l'application	3.2	1.8	2.2
Personnalisation	Capacité à personnaliser l'expérience AR	5.0	1.0	1.0
Sensibilité au contexte	Capacité de l'application à comprendre et à réagir à l'environnement de l'utilisateur	4.6	3.5	4.4
Consommation de la batterie	Impact de l'application sur la durée de vie de la batterie de l'appareil	4.6	4.4	4.2
Stabilité de la réalité augmentée	Cohérence des éléments AR dans l'environnement réel	4.6	4.5	4.8
Pertinence du contenu	Pertinence et utilité du contenu fourni	4.8	4.5	4.6
Engagement des utilisateurs	Niveau d'engagement et de rétention des utilisateurs	5.0	4.8	4.6
Pertinence architecturale	Utilité de l'application pour les concepts de design architectural	5.0	4.4	4.5
Impact sur le processus de conception	Comment l'application influence et améliore le processus de conception	5.0	4.4	4.2
Visualisation des conceptions spatiales	Efficacité dans la visualisation des conceptions spatiales	5.0	5.0	5.0
Support des itérations de conception	Facilité de réaliser et de visualiser les itérations de conception	4.8	1.0	1.0
Intégration avec les outils CAO/BIM	Compatibilité avec les outils CAO/BIM	5.0	1.0	1.0

Paramètre	Description	Floral Tracer	Spolia Botanique	Festum Virtual
Représentation des matériaux et textures	Précision de la représentation des matériaux et textures dans les modèles 3D	5.0	5.0	5.0
Précision des échelles et proportions	Précision des échelles et proportions dans les modèles AR	1.0	1.0	1.0
Impact sur la conception	Efficacité à aider les étapes de conception	5.0	1.0	2.0
Utilisabilité pour l'analyse du site	Utilité pour effectuer des analyses de site et des études de contexte	3.0	4.0	5.0
Simulation environnementale	Capacité à simuler des facteurs environnementaux (lumière, ombre, etc.)	3.0	3.0	3.0
Durée d'utilisation (min)	Temps moyen d'utilisation par session	35	10	15
Niveau d'engagement	Niveau d'engagement des utilisateurs	5.0	4.5	4.0
Évaluation de l'utilisabilité	Note de l'utilisabilité par les utilisateurs	4.0	4.5	4.5
Écart type de l'utilisabilité	Variabilité de l'évaluation de l'utilisabilité	3.5	4.5	5.0
Taux de réussite des tâches (%)	Pourcentage de tâches réussies par les utilisateurs	75.0	90.0	80.0
Net Promoter Score (%)	Indicateur de recommandation de l'application	100.0	100.0	80.0
Évaluation de la satisfaction	Niveau de satisfaction des utilisateurs	5.0	4.5	4.5

Chiffres globaux sur le projet :

10,567 photos prises
55,12 GB de données collecées
111,112,694,784 pixels générés
21 jardins numérisés
80 numérisations réalisées

L’échelle de 1 à 5 correspond aux critères suivants :

- 1 : Très insatisfaisant
- 2 : Insatisfaisant
- 3 : Moyen
- 4 : Satisfaisant
- 5 : Très satisfaisant

Commentaires des étudiants

Nous avons observé différents niveaux d'immersion, différents niveaux d'adaptation et différentes attentes en fonction des outils que les étudiants maîtrisent, mais aussi en fonction des sujets auxquels ils sont sensibles et sur lesquels ils travaillent. Les retours des étudiants ont révélé que l'application interagissait avec leurs diverses méthodes de travail et sujets, tout en offrant de nouvelles opportunités pour questionner des aspects fondamentaux du design architectural.

→ Jérémie Bourbon, étudiant en master 1 travaillant sur les motifs floraux des faïences napolitaines, a réalisé que les fleurs sont positionnées toujours avec le même angle, parallèle au sol, indépendamment de l'angle avec lequel on tient le portable. La rotation des fleurs en fonction du mouvement de la main pourrait en effet augmenter l'immersion. Cependant, Jérémie a également noté que Floral Tracer change complètement le processus de design, permettant de questionner des sujets comme l'échelle, le corps, la perception, la matière et la couleur.

→ Doriann Delaive, étudiant en master 1 travaillant sur les formes d'urbanisme innovantes dans les banlieues de Séoul, s'est approprié l'application très rapidement et a commencé à dessiner des jardins presque immédiatement. Il a plusieurs fois exprimé que les jardins virtuels apparaissaient si présents qu'il a failli trébucher à cause d'une pierre virtuelle ou a changé de chemin pour l'éviter. Doriann a également souligné l'impact positif de Floral Tracer sur la perception de l'espace et des matériaux, enrichissant ainsi son processus de design.

→ Contrairement à Doriann, Julie Zyka, étudiante en master 1 travaillant sur les expériences sensibles à Stockholm, a exprimé un léger manque d'immersion et de réalisme. Travaillant sur les promenades dans sa recherche, elle a signalé que le sol virtuel n'est pas visualisé sous mais sur les pieds des utilisateurs. Cependant, Julie a apprécié comment Floral Tracer permet de reconsidérer les interactions entre le corps et l'espace, ainsi que la manière dont la matière et la couleur influencent la perception sensorielle.

→ Similairement, Mathilde Grillon, étudiante travaillant sur les habitats précaires indiens, a également eu besoin de plus de temps pour accepter l'image visualisée sur l'écran comme un environnement 3D. Différemment des étudiants qui travaillent sur l'ordinateur, Mathilde, travaillant plutôt avec le dessin à la main, a eu besoin de plus de temps pour considérer le portable comme une fenêtre s'ouvrant sur un monde hybride et ainsi se déplacer dedans plutôt que de le regarder en restant fixe en un lieu. Malgré cela, Mathilde a reconnu que Floral Tracer ouvre de nouvelles perspectives en termes de design spatial et de compréhension des échelles et des matériaux.



Bibliographie

La botanique :

Adrien G. Dyer, et. al., « Through the Eyes of a Bee: Seeing the World As a Whole », *Animal Studies Journal*, vol. 5-1, article 7, 2016.

A.G. Dyer et S.K. Williams, « Mechano-optical lens array to simulate insect vision photographically », *Imaging Science Journal*, vol.53, 2005, p.209-213.

Bruno Latour, *Facing Gaia: Eight Lectures on the New Climatic Regime*, Polity Press, 2017.

Daniel Chamovitz, *What A Plant Knows: A Field Guide to The Senses*, Scientific American, 2020.

Darroch Putnam et Michael Putnam, *Flower Color Theory*, Phaidon, 2021.

Emanuele Coccia, *Metamorphoses*, Polity Press, 2021.

Emanuele Coccia, *The Life of Plants: A Metaphysics of Mixture*, Polity Press, 2018.

Francis Hallé, *Éloge de la plante : pour une nouvelle biologie*, Points, 2014.

Gerry Canavan, *Green Planets: Ecology and Science Fiction*, Wesleyan University Press, 2014.

Jakob van Uexküll, *Milieu animal et milieu humain*, (1934) 2010.

James Lovelock, *La terre est un être vivant : l'hypothèse Gaïa*, Flammarion, 2017.

Katherin E. Bishop, et. al. *Plants in Science Fiction: Speculative Vegetation*, University of Wales Press, 2020.

Luce Irigaray et Michael Marder, *Through Vegetal Being: Two Philosophical Perspectives*, 2016.

Matthew Hall, *Plants as Persons: A philosophical Botany*, State University of New York Press, 2011.

Merlin Sheldrake, *Entangled Life: How Fungi Make Our World, Change Our Minds and Shape Our Futures*, Vintage, 2021.

Misha Vorobyev, et. al., « Flowers Through Insect Eyes », *Israel Journal of Plant Sciences*, vol. 45, 1997, p.93-101.

Michael Marder, *Plant-Thinking: A Philosophy of Vegetal Life*, Columbia University Press, 2013.

Michael Marder, *The Philosopher's Plant: An Intellectual Herbarium*, Columbia University Press, 2014.

Natalia Meeker, *Radical Botany: Plants and Speculative Fiction*, Fordham University Press, 2019.

Stefano Mancuso, Alessandra Viola, *L'intelligence des plantes*, Albin Michel, 2018.

Susan K. Pell and Bobbi Angell, *A Botanist's Vocabulary: 1300 Terms Explained and Illustrated*, Timber Press, 2016.

Le numérique:

Alexander Bentley, *The Acceleration of Cultural Change - From Ancestors to Algorithms*, MIT Press, 2017.

Aly Ray Smith, *A Biography of the Pixel*, MIT Press, 2021.

Antoine Picon, *Smart Cities: A Spatialised Intelligence*, John Wiley and Sons, 2015.

Benjamin H. Bratton, *The Stack: On Software and Sovereignty*, MIT Press, 2016.

Carlo Ratti, *The City of Tomorrow: Sensors, Networks, Hackers, and th Future of Urban Life*, Yale University Press, 2016.

Chandler Ahrens, Aaron Sprecher, et. al. *Instabilities and Potentialities: Notes on the Nature of Knowledge in Digital Architecture*, Routledge, 2019.

Éric Sadin, *La vie algorithmique : critique de la raison numérique*, L'Échappée, 2015.

Galo Canizares, *Digital Fabrications: Designer Stories for a Software-Based Planet*, Oro Editions, 2019.

Gerry Canavan, *Green Planets: Ecology and Science Fiction*, Wesleyan University Press, 2014.

Gilles Retsin, *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture*, Wiley, 2019.

Greg Lynn, et. al. *Archeology of the Digital*, Sternberg Press, 2013.

James Lovelock, *Novacene: The Coming Age of Hyperintelligence*, Penguin Books, 2019

John May, *Signal. Image. Architecture.*, Columbia University Press, 2019.

Mario Carpo, *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press, 2017.

Michael Young, *Reality Modeled After Images: Architecture and Aesthetics after the Digital Image*, Routledge, 2021.

Nadim Samman, *Rare Earth*, Sternberg Press, 2016.

Régis Debray, *Vie et mort de l'image : une histoire du regard en Occident*, Gallimard, 1995.

Ron Wakkary, *Things We Could Design for More Than Human-Centered Worlds*, MIT Press, 2021.

Sandrine Maurial, *Une alchimie lumineuse : pigment et pixel comme atomes de la couleur* (thèse), 2005.

Stan Allen, et. al. *When is The Digital in Architecture*, Sternberg Press, 2017.

Stéphane Vial, *L'être et l'écran : Comment le numérique change la perception*, Presses universitaires de France, 2013.

William Mitchell, *City of Bits: Space, Place and the Infobahn*, MIT Press, 1995.

William Mitchell, *Me++: The Cyborg Self and The Networked City*, MIT Press, 2003.