

Travail de Bachelor

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Département : COMEM+

Filière : Ingénierie des médias

Jérémy Martin

8 août 2025

Travail proposé par :

Stéphane Lecorney

Media Engineering Institute (MEI)

Avenue des Sports 20, CH-1401 Yverdon-les-Bains

Supervisé par :

Olivier Ertz

Préambule

Ce travail de Bachelor (ci-après TB) est réalisé en fin de cursus d'études, en vue de l'obtention du titre de Bachelor of Science HES-SO en Ingénierie.

En tant que travail académique, son contenu, sans préjuger de sa valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celles du jury du travail de Bachelor et de l'Ecole.

Toute utilisation, même partielle, de ce TB doit être faite dans le respect du droit d'auteur.

HEIG-VD

Le Chef du Département

Yverdon-les-Bains, le 8 août 2025

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce Travail de Bachelor, tant par leur soutien, leurs conseils que leur disponibilité.

Je remercie tout particulièrement Stéphane Lecorney et Jonathan Favre-Lamarine pour leur accompagnement constant, leurs retours constructifs et leur implication tout au long du projet. Leur regard critique et leur bienveillance ont joué un rôle central dans la progression du travail.

Merci également à l'équipe du Media Engineering Institute (MEI) pour les ressources matérielles mises à disposition, ainsi que pour le cadre de travail stimulant et les échanges réguliers qui ont enrichi la démarche.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux participants des tests utilisateurs, dont les retours ont permis d'améliorer concrètement le prototype et d'approfondir l'analyse de l'expérience utilisateur.

Un merci tout particulier à ma mère, Nicole Martin, pour sa relecture attentive et son soutien indéfectible.

Enfin, je remercie mes proches et mes camarades de la filière Ingénierie des Médias, pour leur présence, leurs encouragements et les nombreux moments partagés au fil de ces années d'études.

Authentification

Le soussigné, Jérémy Martin, atteste par la présente avoir réalisé seul ce travail et n'avoir utilisé aucune autre source que celles expressément mentionnées.

Jérémy Martin



Yverdon-les-Bains, le 8 août 2025

Travail de Bachelor 2024-2025

Résumé publiable

La consommation numérique croît rapidement et son impact énergétique reste largement invisible, limitant la prise de conscience et l'adoption de comportements plus sobres. Ce travail visait à concevoir et évaluer une interface tangible capable de rendre cet impact perceptible dans un foyer et d'encourager une réflexion sur les usages numériques.

En suivant une approche Research through Design, la démarche s'est appuyée sur une recherche documentaire sur les interfaces tangibles, la physicalisation des données et les leviers comportementaux. L'idéation, guidée par le design centré utilisateur et les apports de la calm technology (non intrusive), a mené au choix d'une fleur comme support physique, élément naturel facilement identifiable et à fort impact émotionnel.

Le prototype traduit la consommation numérique hebdomadaire par le degré de fanaison de la fleur, tandis qu'une LED intégrée au bulbe indique régulièrement le débit de données du foyer. Développé de manière itérative, par prototypage et tests utilisateurs, il a révélé trois apports majeurs : la matérialisation d'un phénomène invisible, l'intégration dans l'espace de vie favorisant l'appropriation du message, et un potentiel d'influence sur les comportements.

Les retours montrent que l'objet déclenche une prise de conscience, amène à questionner ses habitudes et éveille la curiosité sur l'impact environnemental du numérique. Ils soulignent également l'intérêt d'une interface numérique pour explorer les données et d'un système de « bonnes actions » pour restaurer la santé de la fleur, ajoutant une dimension positive au suivi.

Mots-clés : interface tangible, physicalisation des données, calm technology, éco-feedback, levier comportemental, nudge, design centré utilisateur, expérience utilisateur, UX design, consommation numérique, Objets connectés, IoT, ESP32, impression 3D, prototypage rapide

Étudiant :

Jérémy Martin

Date et lieu :

30.07.2025, Yverdon-les-Bains

Signature :

Enseignant·e responsable :

Olivier Ertz

Date et lieu :

21.8.2025, Yverdon

Signature :

Media Engineering Institute (MEI) :

Stéphane Lecorney

Date et lieu :

30/07/2025 Yverdon

Signature :

Contribution des outils d'IAG

Dans un souci de transparence et d'intégrité académique, je déclare avoir utilisé ponctuellement des outils d'intelligence artificielle générative (IAG) dans l'élaboration de ce Travail de Bachelor, en tant qu'aides à la rédaction, à la reformulation, à l'organisation de contenu, ainsi qu'au développement de code. Ces outils ont été employés comme soutiens dans un processus créatif et réflexif que j'ai entièrement piloté.

Usage pour la rédaction

Les services ChatGPT (versions 4.1, 4.5 et 4o) d'OpenAI ont été mobilisés pour :

- Clarifier et restructurer certains paragraphes selon les principes de lisibilité du guide COMEM+.
- Adapter le ton et la forme des textes aux deux lectorats visés (académique et professionnel).
- Résumer ou reformuler des passages que j'avais déjà rédigés, afin d'améliorer leur concision ou leur clarté.
- Retravailler les transitions et conclusions de sections sur la base de brouillons ou de notes préalables.
- Structurer, reformuler et synthétiser des contenus issus de mon journal de bord, de mes notes ou de mes annexes.

Ce travail a également été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe à l'aide de ChatGPT, afin d'en améliorer la qualité linguistique, sans altérer le fond ni introduire de contenu nouveau.

À aucun moment je n'ai utilisé ces outils pour générer des contenus à partir de simples instructions. Toutes les informations traitées ont été produites ou sélectionnées par mes soins. Les textes générés ont systématiquement été revus, corrigés et validés par moi-même.

Usage pour le développement

Les différents programmes réalisés dans le cadre de ce Travail de Bachelor ont été conçus avec l'aide ponctuelle des outils suivants :

- ChatGPT 4.1 et 4o (OpenAI), pour reformuler, expliquer ou corriger du code existant, sur la base de mes implémentations.
- Claude Sonnet 4 (Anthropic), pour explorer des alternatives techniques ou clarifier des comportements de fonctions déjà entamées.
- GitHub Copilot (OpenAI/Microsoft), utilisé pour accélérer l'écriture de portions de code dans l'environnement de développement.

Tous les extraits de code ont été compris, adaptés et intégrés avec un regard critique. Aucun module ou composant n'a été utilisé sans validation technique.

Table des matières

Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique et enjeux.....	1
1.3 Objectifs du travail	2
1.4 Délimitations	2
1.5 Structure du rapport	3
Chapitre 2 Présentation synthétique du prototype final	4
2.1 Une interface discrète au sein du quotidien.....	4
2.2 Fonctionnement du prototype.....	4
2.3 Réception et réactions observées	5
2.4 Perspectives	5
Chapitre 3 Revue documentaire et positionnement.....	6
3.1 Levier comportemental.....	6
3.2 Catégories de visualisation de la consommation énergétique	7
3.2.1 Visualisations statistiques.....	7
3.2.2 Éco-visualisations.....	8
3.2.3 Visualisations physiques et ambiantes	9
3.2.4 Synthèse des visualisations énergétiques.....	10
3.3 Data physicalization et interfaces tangibles.....	10
3.3.1 Data physicalization	11
3.3.2 Interfaces tangibles (TUIs)	12
3.3.3 Calm Technology.....	13
3.3.4 Synthèse.....	13
3.4 Analyse comparative des projets existants.....	14
3.4.1 Matrice comparative.....	14
3.4.2 Conclusion et positionnement.....	15

3.5	Synthèse : Revue documentaire et positionnement.....	15
Chapitre 4 Approche méthodologique		16
4.1	Research through Design (RtD)	16
4.2	Méthodes de prototypage	17
4.3	Recherche utilisateur	17
4.4	Séquences de recherche	18
4.5	Synthèse	18
Chapitre 5 Processus de design itératif		19
5.1	Phase d'idéation.....	19
5.1.2	Idéation approfondie	20
5.1.3	Idées retenues	21
5.2	Première itération : prototypes basse fidélité	23
5.2.1	Objectifs	23
5.2.2	Concepts	23
5.2.3	Prototypage	24
5.2.4	Évaluation	26
5.2.5	Résultats et enseignements.....	27
5.3	Deuxième itération : prototype fonctionnel.....	29
5.3.1	Objectifs	29
5.3.2	Développement	29
5.3.3	Évaluation	36
5.3.4	Résultats et enseignements.....	39
Chapitre 6 Résultats.....		40
6.1	Prototype final.....	40
6.2	Résultats des tests utilisateurs.....	40
6.3	Atteinte des objectifs	42
Chapitre 7 Discussion		44
7.1	Critique du processus.....	44
7.2	Critique des résultats	45
7.3	Importance des tests utilisateurs.....	45
7.4	Aspects écologiques du dispositif	46
7.5	Perspectives	47
7.5.1	Pistes d'amélioration et prolongements	47
7.5.2	Potentiel d'intégration ou d'exploitation	48
7.5.3	Ouvertures à d'autres usages ou contextes	48
7.5.4	Synthèse.....	48
7.6	Conclusion.....	48
Bibliographie.....		50

Déclaration sur l'usage des IA.....	55
Glossaire	57
Annexes	62

Liste des figures

Figure 1 – Photographie du prototype fonctionnel réalisé (hauteur 30cm, diamètre 11cm).....	4
Figure 2 – États de santé de la fleur.	4
Figure 3 – Indication lumineuse de la consommation instantanée.....	5
Figure 4 – Schéma du modèle comportemental de Fogg (13) illustrant les trois conditions nécessaires à l'apparition d'un comportement ciblé.	6
Figure 5 – Trois exemples de visualisation statistique de consommation électrique (23). Ces illustrations montrent comment les données peuvent être présentées avec précision pour faciliter l'analyse et la comparaison.	7
Figure 6 – Animation d'un arbre numérique dans l'application mobile ChArGED (24). Cet exemple illustre comment une métaphore visuelle peut renforcer la compréhension et l'engagement.	8
Figure 7 – Power-Aware Cord, un projet de sensibilisation à l'usage d'énergie par un affichage ambiant (26).	9
Figure 8 – Exemple de data physicalization montrant comment une donnée scientifique peut être matérialisée pour faciliter sa compréhension et son interprétation (29).	11
Figure 9 – Interface tangible (SandScape) démontrant le lien direct entre la manipulation physique et la visualisation de données complexes (30, 31).	12
Figure 10 – Matrice comparative de projets d'interfaces tangibles selon la nature de l'interaction (passive ou active) et la modalité de représentation (symbolique ou analytique).....	14
Figure 11 – Processus itératif de conception basé sur le Research through Design (56, p. 24).....	16
Figure 12 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents.....	21
Figure 13 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est droite, avec une tige verte rigide, une tête plate composée de pétales blancs et d'un centre jaune, le tout dans un pot en terre cuite sur une table en bois clair, fond beige.	22
Figure 14 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas, exprimant un état d'alerte ou de surconsommation. Le pot en terre cuite est posé sur une table en bois clair, avec un fond beige lisse.....	22
Figure 15 – Photographie du prototype basse fidélité du Personnage du numérique.	24
Figure 16 – Photographie du prototype basse fidélité de la Fleur qui fane en position verticale lorsque le câble est tendu.	25
Figure 17 – Photographie du prototype basse fidélité de la Fleur qui fane en position inclinée simulant la fanaison lorsque le câble est relâché.	25
Figure 18 – Vue globale de la Fleur numérique en modèle 3D. Représentation complète du prototype final haute fidélité, montrant l'intégration de la tige, de la tête et du pot.	30

Figure 19 – Version finale de la tige avec articulations à vis métriques M2. Conception améliorée offrant plus de robustesse, de précision et facilitant l’assemblage et le démontage.	30
Figure 20 – Première version de la tige en une seule pièce imprimée en 3D. Prototype initial avec articulations intégrées, testé pour valider le concept mais présentant des problèmes de solidité et de précision.	30
Figure 21 – Vue rapprochée montrant la contrainte d’espace et la solution retenue. Les trois images juxtaposées illustrent respectivement le passage des câbles en entrée, dans l’articulation et en sortie.	31
Figure 22 – Base en deux parties. Partie supérieure servant de support à la tige et partie inférieure accueillant les composants électroniques, conçues pour s’intégrer dans le pot.....	31
Figure 23 – Empotage en vue 3D. Schéma montrant l’assemblage de la base et des composants électroniques dans un pot de fleur du commerce.....	31
Figure 24 – Tête, pétales et capitule de la fleur en modèle 3D. Détail des éléments constituant la tête de la fleur, avec les pétales en feutrine et le capitule accueillant la LED RGB.	32
Figure 25 – Position des principaux composants électroniques dans la Fleur numérique.	33
Figure 26 – Test utilisateur du prototype fonctionnel, tâche 2 : Simulation d’une semaine d’utilisation, page du lundi, sélection des activités.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1 – Séquences de recherche du projet	18
Tableau 2 – Déroulement du workshop et observations associées.	19
Tableau 3 – Filaments utilisés pour l'impression 3D du prototype final.	32
Tableau 4 – Composants principaux de la Fleur numérique.	33
Tableau 5 – Résultats UEQ du prototype final : graphique en barres des moyennes par dimension.....	41
Tableau 6 – Estimation de la consommation électrique hebdomadaire du prototype et équivalence en données économisées pour compenser son impact.....	46

Liste des codes sources

Code source 1 – Commande JSON de contrôle de la LED.	35
Code source 2 – Commande JSON du contrôle du degré de fanaison.	36
Code source 3 – Commande JSON du contrôle de la mise en veille.	36

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Le Media Engineering Institute (MEI) (1) est l'un des instituts de recherche appliquée de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) (2). Il regroupe une vingtaine de collaboratrices et collaborateurs et mène des projets dans les domaines de l'ingénierie des médias, des systèmes interactifs et de la visualisation de données (1). L'institut collabore régulièrement avec des partenaires industriels et institutionnels, mobilisant des expertises variées en développement logiciel, design UX et analyse de données.

Parmi ses réalisations, les projets CarbonViz (3) et CarbonViz Home (4) visent à rendre perceptible l'impact environnemental des usages numériques, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux services en ligne. CarbonViz est une extension gratuite et open source permettant de visualiser en temps réel l'empreinte carbone de la navigation web, selon un modèle de calcul spécifiquement développé pour le contexte suisse (3). CarbonViz Home, développé en collaboration avec l'institut Reconfigurable and Embedded Digital Systems (REDS) (5), utilise un routeur domestique modifié pour collecter les flux réseau d'un foyer et en restituer une analyse visuelle (6).

1.2 Problématique et enjeux

Ces projets répondent à un enjeu environnemental majeur : en Suisse, environ 8 % de la consommation électrique nationale est imputable aux technologies numériques (7). À l'échelle mondiale, le secteur représente entre 3 et 4 % des émissions globales de GES, un chiffre susceptible de doubler ou tripler d'ici 2030 si la croissance actuelle se poursuit (8). Près de la moitié de cette consommation provient des centres de données et des réseaux, l'autre moitié des équipements des utilisateurs finaux (9). Les impacts environnementaux sont toutefois majoritairement liés à la fabrication de ces équipements, qui mobilise d'importantes ressources tout au long de leur cycle de vie.

Pourtant, cette consommation reste largement invisible pour les utilisateurs (cf. Annexe 19, section 2). Les gestes quotidiens tels que le *streaming* vidéo, l'usage des réseaux sociaux ou le stockage en ligne paraissent immatériels, alors qu'ils sollicitent des infrastructures complexes et énergivores. L'absence de signaux tangibles empêche une prise de conscience efficace et freine l'adoption de comportements plus sobres.

Face à ce constat, l'intégration d'interfaces tangibles (TUI) dans l'environnement domestique apparaît comme un levier de sensibilisation. Les recherches présentées en Annexe 19 (cf. sections 3.2 à 3.3) montrent que des visualisations physiques, discrètes mais persistantes, peuvent fournir un retour d'information contextuel et intuitif, stimulant la curiosité et favorisant l'engagement comportemental (10, 11).

Le présent Travail de Bachelor s'inscrit dans cette continuité. Il vise à concevoir un prototype tangible qui traduise, dans l'espace de vie du foyer, des données représentatives de la consommation numérique en signaux physiques compréhensibles par tous. L'hypothèse centrale est qu'une présence physique continue et intelligible peut déclencher une prise de conscience durable et encourager un usage plus sobre du numérique.

1.3 Objectifs du travail

Ce Travail de Bachelor avait pour objectif central de concevoir et évaluer un prototype d'interface tangible permettant de rendre perceptible l'impact énergétique des usages numériques dans un foyer.

Les recherches sur le nudging (12) et sur le modèle comportemental de Fogg (13) montrent que rendre visibles et compréhensibles les conséquences d'un comportement constitue un levier efficace pour induire un changement volontaire. Dans le domaine énergétique, les systèmes d'éco-feedback ont démontré que la visualisation claire et contextualisée des données favorise une réduction mesurable de la consommation (10, 14).

Dans ce contexte, ce Travail de Bachelor explore comment une interface tangible peut matérialiser l'impact énergétique global d'un foyer numérique de manière intuitive, continue et intégrée à l'environnement quotidien, dans le but de favoriser une prise de conscience durable et d'encourager des usages plus sobres.

À partir de la pré-étude (cf. Annexe 19, section 6.1), les objectifs ont été ajustés pour concentrer les ressources sur la conception tangible et garantir un résultat fonctionnel dans les délais impartis. Les objectifs spécifiques sont :

1. Créer une expérience utilisateur tangible engageante

Développer un objet physique interactif capable de communiquer une information claire et compréhensible sur la consommation numérique. L'interface devait s'intégrer discrètement dans l'environnement domestique, conformément aux principes de la *Calm Technology* (15), tout en suscitant l'attention de manière non intrusive (11).

2. Rendre visibles les conséquences énergétiques des activités numériques

Concevoir un dispositif capable de matérialiser, de manière intuitive et immédiatement interprétable, l'empreinte environnementale d'un foyer numérique, en explorant les formes, signaux et interactions permettant de traduire physiquement des données habituellement invisibles.

3. Favoriser un changement de comportement volontaire

Intégrer des mécanismes inspirés du *nudging* (12) et de l'éco-feedback (10, 14) afin d'inciter les membres du foyer à ajuster leurs usages numériques, par un retour d'information contextualisé et émotionnellement engageant.

1.4 Délimitations

Le présent Travail de Bachelor se concentre exclusivement sur la conception et l'évaluation d'un prototype tangible représentant la consommation énergétique globale d'un foyer numérique à partir de données simulées issues de CarbonViz Home (cf. Annexe 19, section 3.6).

Le périmètre exclut :

- La distinction des usages par catégories de services (*streaming*, réseaux sociaux, navigation, etc.), écartée pour privilégier la lisibilité et l'interprétation immédiate des signaux tangibles (cf. Annexe 19, sections 3.2 à 3.3).
- Le développement d'une extension numérique complémentaire (tableau de bord ou application), prévue initialement dans la pré-étude, mais reportée et présentée comme piste d'amélioration future (chapitre 8).
- La réalisation de mesures prolongées en conditions réelles ; les données utilisées proviennent de campagnes antérieures de CarbonViz Home.

Ces délimitations fixent un périmètre réaliste au regard des contraintes temporelles, tout en garantissant la production d'un prototype fonctionnel, testable et représentatif d'un usage domestique crédible.

1.5 Structure du rapport

La structure de ce rapport s'appuie sur les recommandations issues des guides de rédaction scientifique (16, 17), qui préconisent une organisation en « entonnoir » : partir d'un contexte général, formuler la problématique et les objectifs, présenter la méthodologie, exposer les résultats, puis conclure par une discussion critique et des perspectives. Cette organisation, largement utilisée en sciences appliquées, vise à amener progressivement le lecteur vers l'interprétation des résultats (18).

Cependant, afin de répondre aux besoins d'un double lectorat composé d'un public académique et d'un mandant professionnel non spécialiste, ce rapport déroge légèrement à la chronologie scientifique classique. Un chapitre 2 « Présentation synthétique du prototype final » est placé juste après l'introduction et la problématique. Ce choix permet :

1. D'offrir au lecteur une compréhension immédiate de la solution réalisée, facilitant ainsi l'accès aux sections suivantes.
2. De contextualiser les parties méthodologiques et théoriques, en donnant une image claire de la finalité du projet dès les premières pages.

Les chapitres suivants reprennent ensuite la logique académique :

- Chapitre 3 : Revue documentaire et positionnement
- Chapitre 4 : Approche méthodologique
- Chapitre 5 : Processus de design itératif
- Chapitre 6 : Résultats
- Chapitre 7 : Discussion

Les annexes complètent le rapport par des informations détaillées.

Chapitre 2

Présentation synthétique du prototype final

Ce chapitre présente de manière structurée et accessible le prototype développé dans le cadre de ce travail. Conformément aux recommandations du guide de rédaction COMEM+ (17), son contenu tient compte d'un double lectorat. Il s'adresse à la fois à un public académique et à des interlocuteurs professionnels non spécialistes.

Dans cette optique, la forme adoptée ici est plus narrative et illustrée que dans les sections suivantes. Elle vise à offrir une compréhension immédiate du dispositif final, avant l'approfondissement théorique et méthodologique.

2.1 Une interface discrète au sein du quotidien



Figure 1 – Photographie du prototype fonctionnel réalisé (hauteur 30cm, diamètre 11cm).

Posée sur une étagère ou un plan de travail, la fleur numérique peut d'abord être perçue comme un simple objet décoratif.

Sa tige verte, ses pétales bleu outremer et son format sobre évoquent une plante artificielle ordinaire. Pourtant, sa fonction est tout autre.

Par sa posture et par une lumière colorée, cette fleur traduit l'évolution de la consommation numérique d'un foyer.

La présence visible d'un port USB-C trahit partiellement la nature électronique du dispositif. Néanmoins, l'ensemble reste conçu pour une intégration discrète dans l'environnement domestique, sans écran, sans interface intrusive, sans signal sonore.

La fleur s'exprime par des signaux visuels simples, suffisamment explicites pour être compris au quotidien, sans apprentissage particulier.

2.2 Fonctionnement du prototype

Le fonctionnement du dispositif repose sur une logique hebdomadaire.

Chaque lundi, la fleur débute son cycle en position verticale, représentant un état de « santé » numérique optimale.

Au fil des jours, la consommation de données cumulée est comparée à un seuil prédéfini. La tige de la fleur s'incline proportionnellement à ce rapport entre usage et seuil, traduisant visuellement le niveau d'intensité des usages. Ce mouvement permet de voir une forme de « fatigue numérique », exprimée de manière tangible.

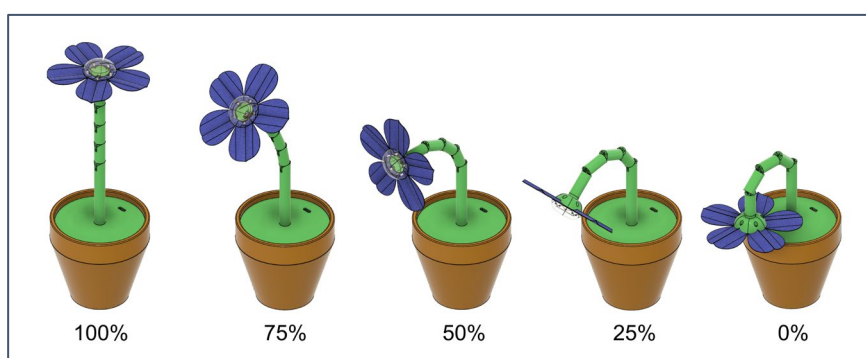


Figure 2 – États de santé de la fleur.

En parallèle, une LED située au centre de la fleur s'illumine brièvement à intervalles réguliers pour signaler l'intensité de la consommation instantanée :



Figure 3 – Indication lumineuse de la consommation instantanée.

Le dispositif articule ainsi deux niveaux d'information :

- La posture reflète l'évolution de la consommation sur la semaine.
- La lumière informe sur l'état de consommation au moment présent.

Ce système permet une lecture intuitive du message transmis. L'utilisateur ou l'utilisatrice n'a pas besoin d'interagir avec un écran ou de consulter des données chiffrées. La fleur devient un indicateur visuel passif, mais présent, qui s'inscrit dans le quotidien.

2.3 Réception et réactions observées

Lors des tests utilisateurs, la fleur numérique a suscité de nombreuses réactions, en particulier au moment où elle modifiait sa posture.

« Clairement la fleur a réagi à ma consommation de données. »

La progression vers une position inclinée a généré des interrogations, parfois même un léger malaise.

Un participant a exprimé ce ressenti de manière spontanée :

« Ça m'a un peu freiné quand j'ai vu la réaction. »

Dans plusieurs cas, ce signal visuel a suffi à provoquer une prise de conscience :

« Je pourrais télécharger la musique et l'écouter en local. »

Ces extraits illustrent le potentiel du dispositif. En rendant visible un phénomène abstrait, la fleur suscite un changement de perception, sans consigne explicite ni interface directive.

2.4 Perspectives

Le prototype actuel fonctionne à partir de données simulées. Ce fonctionnement permet déjà d'atteindre l'objectif initial : susciter une réflexion sur les pratiques numériques domestiques.

Plusieurs axes d'amélioration ont néanmoins été identifiés.

Le premier concerne l'ajout d'une interface numérique complémentaire. Un tableau de bord, accessible sur ordinateur ou téléphone mobile, permettrait à l'utilisateur de consulter ses données, de comprendre les usages les plus énergivores, et d'adapter son comportement en conséquence.

Le deuxième axe consiste à introduire une dimension positive. Actuellement, la fleur se fane lorsque la consommation augmente. Une évolution possible serait de permettre à la fleur de se redresser lorsque des efforts sont faits. Cette dynamique de rétroaction visuelle positive renforcerait l'engagement et encouragerait des actions concrètes.

Enfin, une perspective essentielle réside dans la connexion à des données réelles. En s'appuyant sur un service comme CarbonViz Home, la fleur pourrait être reliée à la consommation effective d'un foyer, permettant ainsi un usage en conditions réelles.

En somme, la fleur numérique offre une réponse tangible à une problématique invisible. Elle matérialise l'impact environnemental de nos usages numériques à travers un langage visuel simple, lisible et discret.

Ce dispositif n'impose rien. Il invite à réfléchir. Et parfois, il incite à changer.

Chapitre 3

Revue documentaire et positionnement

Ce chapitre présente une analyse de la littérature et des projets existants relatifs à la visualisation énergétique, aux leviers comportementaux et aux TUIs. L'objectif est d'identifier les approches et mécanismes les plus pertinents pour concevoir un dispositif capable de rendre visible la consommation numérique dans un foyer et de favoriser un changement de comportement durable.

Les contenus présentés ici s'appuient en grande partie sur les recherches et l'analyse documentaire menées lors de la pré-étude. Vous pouvez consulter l'Annexe 19 pour retrouver l'intégralité de ces éléments.

3.1 Levier comportemental

La réduction de l'impact environnemental des usages numériques ne peut se limiter à des optimisations techniques, elle nécessite également des changements comportementaux chez les utilisateurs finaux (12, 19). Les études en psychologie environnementale montrent que rendre visibles les conséquences d'un comportement peut constituer un levier puissant pour induire des modifications volontaires des habitudes (13, 20).

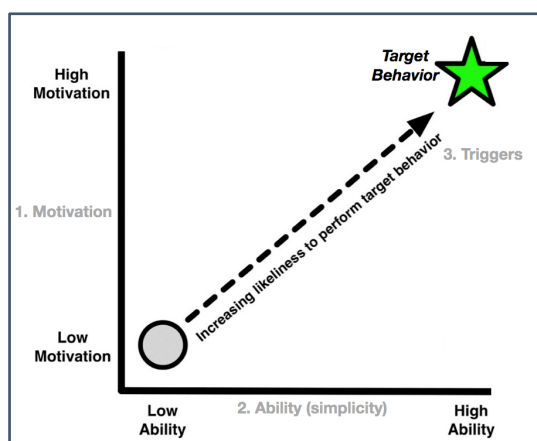


Figure 4 – Schéma du modèle comportemental de Fogg (13) illustrant les trois conditions nécessaires à l'apparition d'un comportement ciblé.

Dans ce contexte, deux approches complémentaires se distinguent :

- **Le nudging**, défini comme une intervention subtile dans l'environnement de prise de décision, orientant les comportements sans restreindre les choix (12). Appliqué au domaine énergétique, le *nudging* s'appuie sur la mise en évidence immédiate d'un écart entre le comportement actuel et un comportement souhaité, souvent via des signaux visuels ou contextuels (14, 19).
- **L'éco-feedback**, qui consiste à fournir aux utilisateurs des informations directes et contextualisées sur leur consommation. Les retours visuels peuvent être numériques, physiques ou hybrides, et sont généralement corrélés à une réduction mesurable de la consommation énergétique lorsque l'information est claire, continue et perçue comme pertinente (19–21).

Les recherches analysées dans la pré-étude (cf. Annexe 19, section 3.1) convergent vers l'idée que la combinaison de ces deux leviers maximise l'efficacité : le *nudging* stimule l'attention et initie la réflexion, tandis que l'éco-feedback entretient la conscience de la consommation et guide les ajustements sur la durée.

Ce principe a directement orienté la conception du prototype : fournir un signal tangible, discret et persistant qui attire l'attention sur le niveau de consommation, tout en restant facilement interprétable sans effort cognitif important.

3.2 Catégories de visualisation de la consommation énergétique

La visualisation de la consommation énergétique peut prendre plusieurs formes, allant des graphiques statistiques traditionnels aux dispositifs physiques intégrés dans l'environnement. Les travaux recensés dans la pré-étude (cf. Annexe 19, section 3.2) distinguent trois grandes catégories :

3.2.1 Visualisations statistiques

Les visualisations statistiques présentent la consommation énergétique sous forme de données quantitatives précises, souvent organisées en graphiques à barres, courbes temporelles, histogrammes ou diagrammes circulaires. Elles sont largement utilisées dans les tableaux de bord et rapports énergétiques produits par les fournisseurs ou les systèmes de gestion de l'énergie (22).

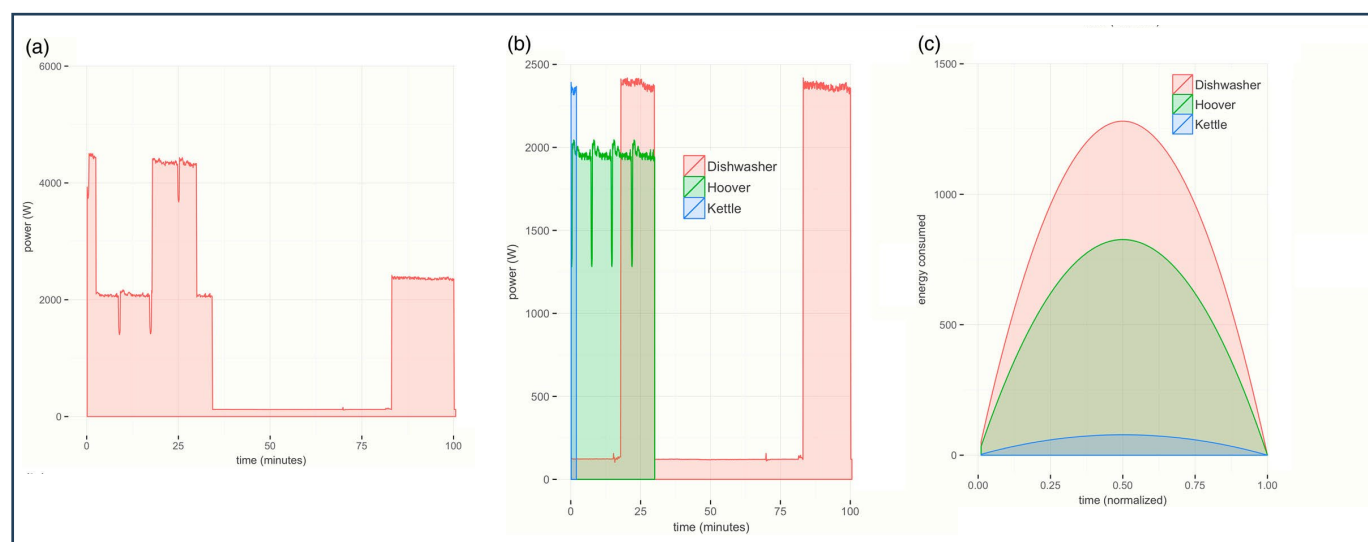


Figure 5 – Trois exemples de visualisation statistique de consommation électrique (23). Ces illustrations montrent comment les données peuvent être présentées avec précision pour faciliter l'analyse et la comparaison.

Caractéristiques

- Précision élevée : mesure chiffrée exacte (kWh, CO₂, Mbits transférés, etc.) (20, 22).
- Historique complet : suivi de la consommation sur des périodes variées (jour, semaine, mois, année) et réalisation de comparaisons temporelles (22).
- Analyses complexes possibles : intégration de filtres par type d'équipement ou par période, croisement avec d'autres données (ex. : météo, coût) (20).

Avantages

- Adaptées à un public expert ou aux utilisateurs ayant un fort intérêt pour l'optimisation énergétique (22).
- Facilitent la prise de décision informée dans des contextes professionnels ou techniques (20).
- Compatibles avec les outils de suivi automatisé et les systèmes analytiques existants (21).

Limites

- Effort cognitif élevé : l'utilisateur doit interpréter les données, comprendre les unités et établir ses propres conclusions (21).
- Moins efficaces pour provoquer un changement comportemental rapide : nécessitent une consultation active sur un support numérique (ex. : ordinateur, smartphone) (20).
- Peu adaptées à un usage passif ou intégré au quotidien, surtout pour un public non spécialiste (19, 20).

En résumé, les visualisations statistiques sont pertinentes pour l'analyse détaillée et la prise de décision technique, mais leur capacité à influencer directement les comportements dans un contexte domestique reste limitée, en raison de la distance entre l'information affichée et l'action quotidienne.

3.2.2 Éco-visualisations

Les éco-visualisations traduisent les données de consommation énergétique en représentations graphiques plus intuitives, souvent visuellement attractives, et conçues pour être comprises par un public non spécialiste. Elles cherchent à simplifier l'interprétation des données, en utilisant des métaphores visuelles, des codes couleur et des animations (19, 20).

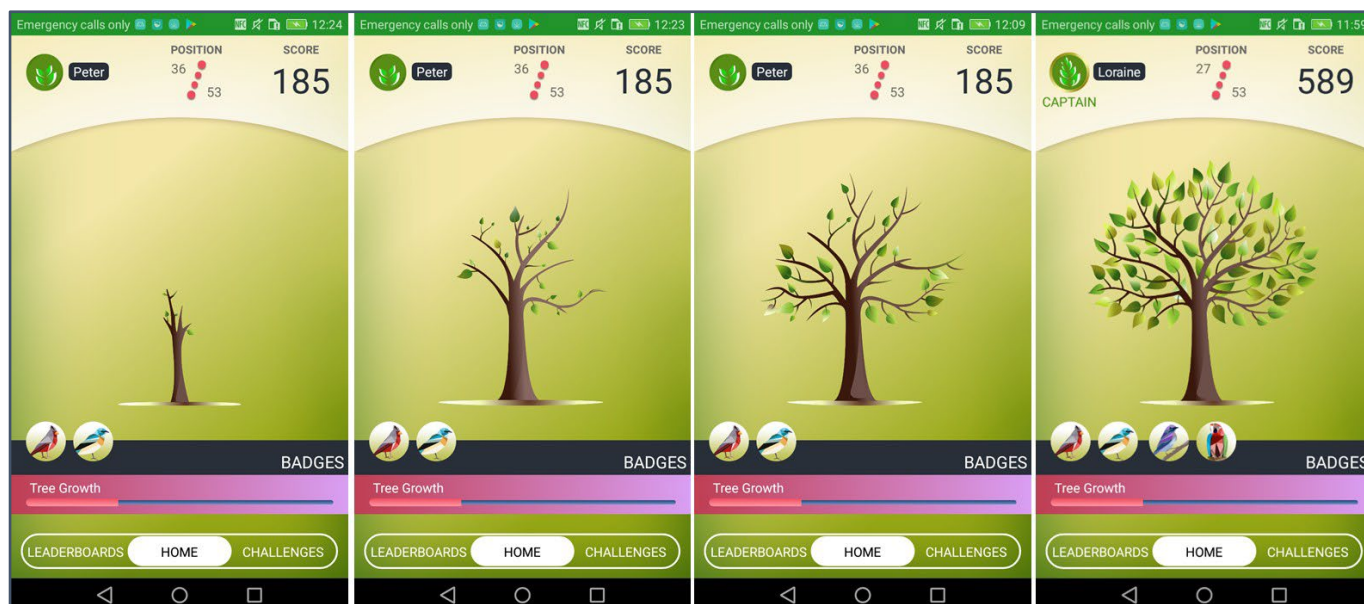


Figure 6 – Animation d'un arbre numérique dans l'application mobile ChArGED (24). Cet exemple illustre comment une métaphore visuelle peut renforcer la compréhension et l'engagement.

Caractéristiques

- Représentations symboliques ou métaphoriques : par exemple, un arbre qui perd ses feuilles lorsque la consommation augmente, ou une jauge colorée indiquant le niveau de dépense énergétique (19, 24).
- Utilisation de codes visuels universels (vert = bon, rouge = mauvais) pour faciliter la lecture (19, 20).
- Intégration possible dans des interfaces numériques dédiées ou existantes (applications, tableaux de bord) (19).

Avantages

- Accessibilité accrue : lecture facilitée pour un large public, même sans connaissances techniques (20).
- Impact émotionnel : les métaphores visuelles suscitent une réaction affective qui peut motiver un changement de comportement (19).
- Réduction de l'effort cognitif : l'utilisateur n'a pas besoin de décoder des chiffres complexes, il interprète directement les signaux visuels (21).

Limites

- Précision réduite : la traduction visuelle simplifie les données et peut masquer des détails importants pour l'analyse fine (21).
- Généralement dépendantes d'un support numérique nécessitant une consultation active (20).
- Risque de baisse d'attention à long terme si la visualisation n'est pas renouvelée ou contextualisée (19, 20).

En résumé, les éco-visualisations sont efficaces pour attirer l'attention et initier une prise de conscience, mais leur ancrage dans un environnement généralement numérique limite leur persistance dans le quotidien. Elles constituent un compromis entre précision statistique et impact émotionnel.

3.2.3 Visualisations physiques et ambiantes

Les visualisations physiques et ambiantes déplacent l’affichage de la consommation énergétique hors de l’écran pour l’intégrer directement dans l’environnement physique de l’utilisateur. Elles utilisent des objets tangibles, des signaux lumineux ou sonores, et parfois des mécanismes mécaniques pour traduire les données de manière perceptible au quotidien (19, 25).

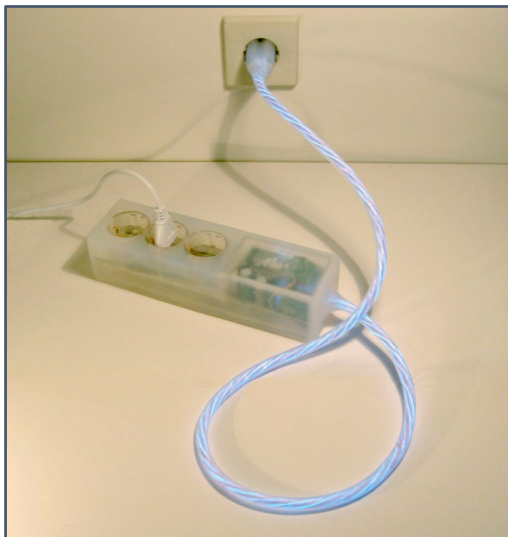


Figure 7 – Power-Aware Cord, un projet de sensibilisation à l’usage d’énergie par un affichage ambiant (26).

Caractéristiques

- Intégration dans l’espace domestique ou professionnel : par exemple, lampes changeant de couleur selon le niveau de consommation, ou éléments mécaniques se déplaçant en fonction des données (19).
- Retour d’information passif : l’utilisateur perçoit les variations sans action volontaire ni consultation d’un écran (15, 19, 20).
- Possibilité de multimodalité : combinaison de signaux visuels, sonores ou haptiques pour enrichir la perception (11).

Avantages

- Présence continue : les informations sont visibles en permanence, favorisant une sensibilisation à long terme (21).
- Réduction de l’effort cognitif : l’utilisateur comprend le message sans avoir à décoder des données chiffrées (19).
- Impact comportemental renforcé : la matérialisation physique crée une connexion émotionnelle plus forte avec l’information (11).

Limites

- Complexité de conception : nécessité de développer un objet fonctionnel, fiable et esthétique (19).
- Précision limitée : les retours visuels ou mécaniques simplifient souvent les données pour conserver la lisibilité (20).
- Coût et maintenance : l’intégration physique implique des matériaux, une alimentation et éventuellement une connectivité continue (19).

En résumé, les visualisations physiques et ambiantes sont particulièrement adaptées aux contextes où la présence passive et la compréhension immédiate priment sur la précision analytique. Elles sont au cœur de l’approche choisie pour ce Travail de Bachelor, car elles permettent de rendre tangible un phénomène souvent invisible : l’impact énergétique du numérique.

3.2.4 Synthèse des visualisations énergétiques

L'analyse des différentes catégories de visualisation a permis d'identifier plusieurs enseignements clés pour la conception du prototype.

Les visualisations statistiques apportent une précision et une profondeur d'analyse indispensables dans le cadre d'un outil numérique complémentaire, tel qu'une application web ou un tableau de bord. Elles constituent une base solide pour fournir à l'utilisateur une vision détaillée de ses usages et lui permettre d'explorer les données.

Les éco-visualisations se distinguent par leur capacité à rendre l'information accessible et engageante grâce à des représentations simplifiées et souvent métaphoriques. Généralement numériques, elles peuvent toutefois être physiques ou hybrides. Elles offrent l'avantage de faciliter la compréhension pour un large public, de susciter un impact émotionnel fort et de favoriser l'engagement en établissant un lien direct entre l'action de l'utilisateur et ses conséquences.

En alliant l'aspect physiques et ambiantes à la logique des éco-visualisations, on ajoute la dimension de présence continue dans l'environnement. Ces éco-visualisations physiques permettent un retour d'information passif, sans sollicitation active de l'utilisateur. Cette approche se rapproche des principes de la *Calm Technology*, qui seront détaillés dans la section 3.3, et qui visent à informer sans être intrusifs.

Pour la suite du projet, ces enseignements justifient le choix :

- D'utiliser une métaphore visuelle pour traduire l'impact énergétique en un signal immédiatement interprétable par l'utilisateur.
- D'intégrer cette visualisation dans une interface tangible afin de maximiser la visibilité et l'ancrage dans le quotidien.
- De simplifier le message visuel pour garantir une compréhension immédiate par tous les membres d'un foyer.
- De concevoir un signal présent en permanence dans l'environnement, mais suffisamment discret pour ne pas gêner ou provoquer une lassitude, de manière à maintenir la sensibilisation sur la durée.

Ce positionnement combine l'impact émotionnel des éco-visualisations et la continuité d'usage des dispositifs physiques et ambiants, tout en préparant l'intégration des principes de la *Calm Technology*.

Pour compléter cette analyse, la section suivante explore trois concepts transversaux issus de la recherche en interaction homme-machine qui apportent des réponses complémentaires aux enjeux identifiés : la *data physicalization*, les TUIs et la *Calm Technology*.

3.3 Data physicalization et interfaces tangibles

Les trois sous-sections suivantes présentent des notions étroitement liées qui forment le socle conceptuel du dispositif envisagé. La *data physicalization* définit le principe général de rendre des données tangibles, les TUIs en précisent les modalités d'intégration et d'interaction, et la *Calm Technology* apporte un cadre pour garantir que la présence de l'interface reste discrète et pertinente dans le temps.

3.3.1 Data physicalization

La *data physicalization* désigne la pratique consistant à représenter des données sous une forme physique afin de faciliter leur exploration, leur compréhension et leur mémorisation (27, 28). Contrairement aux visualisations purement numériques, elle exploite les capacités sensorielles et motrices humaines pour rendre l'information plus concrète et engageante (27).

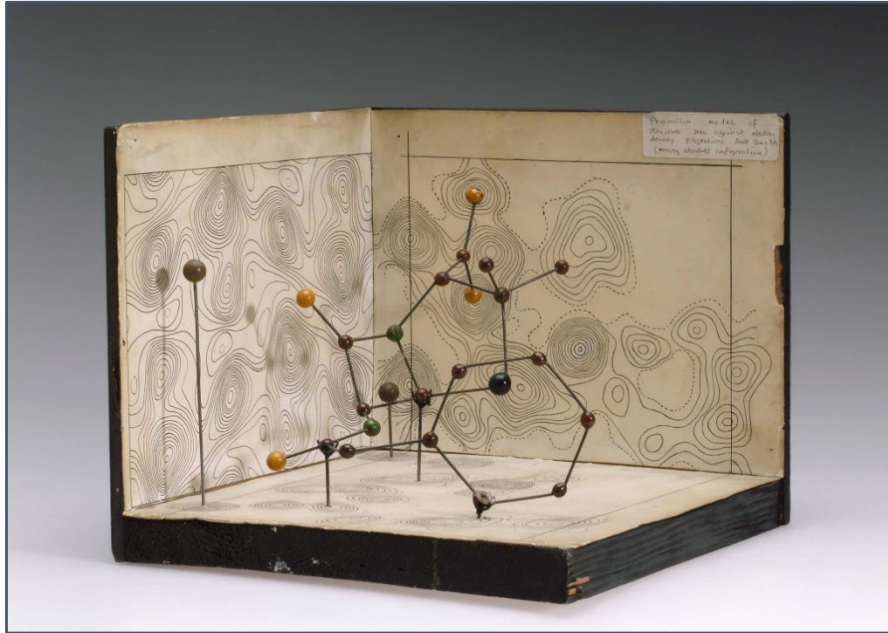


Figure 8 – Exemple de *data physicalization* montrant comment une donnée scientifique peut être matérialisée pour faciliter sa compréhension et son interprétation (29).

Les avantages principaux identifiés dans la littérature (27, 28) sont :

- Accessibilité accrue : les données peuvent être perçues par un public ne maîtrisant pas les codes graphiques ou statistiques traditionnels.
- Engagement physique et émotionnel : la matérialisation crée un lien plus personnel et mémorable avec l'information.
- Interaction directe : l'utilisateur peut percevoir ou manipuler l'objet pour explorer l'information, ce qui renforce l'apprentissage.

Cependant, cette approche comporte aussi des limites (27, 28) :

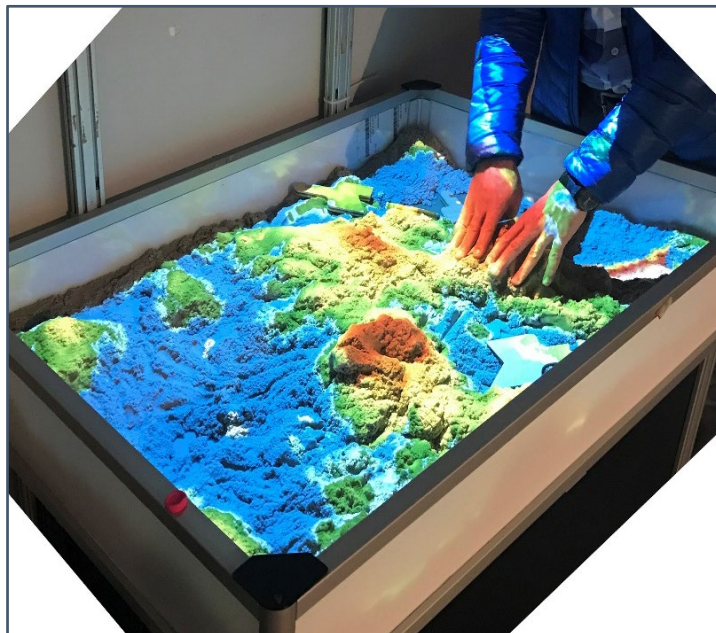
- Précision réduite : les représentations physiques simplifient souvent les données pour en faciliter l'interprétation.
- Complexité de conception : produire un artefact physique fiable, lisible et esthétique nécessite un savoir-faire technique et un prototypage itératif.

Dans le cadre de ce Travail de Bachelor, la *data physicalization* constitue un cadre conceptuel central : elle permet de rendre tangible l'impact énergétique du numérique dans un foyer, un phénomène habituellement invisible, et de favoriser une prise de conscience par la présence continue d'un objet porteur de sens.

3.3.2 Interfaces tangibles (TUIs)

Les TUIs désignent des systèmes interactifs qui permettent de représenter et de manipuler des données à travers des objets physiques (11, 25). Elles établissent un lien direct entre l'information numérique et sa manifestation matérielle, en mobilisant la perception sensorielle, les gestes et les capacités de manipulation de l'utilisateur.

Figure 9 – Interface tangible (SandScape) démontrant le lien direct entre la



manipulation physique et la visualisation de données complexes (30, 31).

Les caractéristiques principales relevées dans la littérature (11, 20, 25, 32) sont :

- Couplage fort entre action et retour : toute manipulation physique déclenche une réponse immédiate et compréhensible.
- Intégration dans l'environnement : le dispositif est conçu pour s'inscrire naturellement dans le contexte d'utilisation, favorisant la consultation spontanée.
- Potentiel narratif et symbolique : la forme, le mouvement ou la texture de l'objet renforcent la signification et l'impact émotionnel du message transmis.

Les TUIs présentent plusieurs avantages (11, 20, 33) :

- Interaction intuitive : elles exploitent des gestes et manipulations naturelles, réduisant l'effort d'apprentissage.
- Visibilité accrue : l'objet physique attire l'attention et sert de rappel visuel constant, même sans interaction active.
- Engagement renforcé : la matérialité de l'objet favorise un lien émotionnel et mémorable avec l'information.

Toutefois, elles comportent aussi certaines limites (11, 32) :

- Complexité technique : leur conception requiert la maîtrise de compétences pluridisciplinaires (électronique, mécanique, design d'interaction).
- Coût et maintenance : un objet interactif physique implique des matériaux, une alimentation et parfois une connectivité continue.

Dans le cadre de ce Travail de Bachelor, les TUIs constituent un cadre conceptuel central. Elles rendent perceptibles et compréhensibles des phénomènes invisibles, tels que la consommation énergétique, en intégrant l'information dans un objet tangible présent en permanence dans l'environnement domestique (19, 20).

3.3.3 Calm Technology

Le concept de *Calm Technology* a été introduit par Weiser et Brown en 1996 (34) pour décrire des systèmes technologiques capables de fournir des informations utiles tout en restant discrets, de manière à ne pas perturber l'attention principale de l'utilisateur. Dans leur vision, une technologie calme diffuse l'information en arrière-plan, de manière à ce qu'elle soit perceptible sans monopoliser l'attention. Elle ne passe au premier plan et ne sollicite directement l'utilisateur que lorsque cela est nécessaire pour agir ou prendre une décision (34).

Des travaux plus récents, tels que ceux de Tan, Chen et Peng (15), ont approfondi ce concept en proposant un cadre de conception articulé autour de principes et *patterns* d'interaction visant à maintenir l'équilibre entre visibilité et discrétion. Selon ces auteurs, une *Calm Technology* doit :

1. Informer sans interrompre : l'information est toujours disponible mais ne monopolise pas l'attention (15).
2. S'intégrer à l'arrière-plan : le dispositif reste discret tant qu'aucune action ou décision n'est nécessaire (34).
3. Passer au premier plan au bon moment : le signal devient plus visible ou perceptible en cas de changement ou de dépassement d'un seuil (15, 19).
4. Réduire la charge cognitive : les signaux doivent être simples, clairs et directement interprétables, quel que soit le profil utilisateur (20).

Plusieurs études montrent que ce type de conception améliore la perception continue des informations sans générer de fatigue visuelle ou mentale. Dans le domaine énergétique, Chalal et al. (19) identifient la présence continue et le retour d'information passif comme des facteurs essentiels pour maintenir la sensibilisation à long terme, tout en minimisant l'effort d'attention requis.

Appliqués à ce Travail de Bachelor, les principes de la *Calm Technology* justifient plusieurs choix :

- Présence permanente mais discrète de l'objet dans l'environnement domestique (15).
- Utilisation de signaux visuels simples (couleurs, mouvement) qui ne nécessitent pas de décodage complexe (20).
- Accentuation du signal uniquement lors d'un changement significatif (par exemple, dépassement du seuil hebdomadaire de consommation) (19).

Ainsi, la *Calm Technology* constitue un cadre de conception stratégique pour garantir que l'interface tangible soit à la fois informative, non intrusive et engageante, soutenant l'objectif de sensibilisation durable à l'impact énergétique du numérique.

3.3.4 Synthèse

L'étude conjointe de la *data physicalization*, des TUIs et des principes de la *Calm Technology* met en évidence une complémentarité forte entre ces approches.

L'objectif est de concevoir une *data physicalization* des données de consommation numérique d'un foyer, afin de renforcer l'engagement émotionnel et la mémorisation de l'information.

Cette physicalisation peut être rendue plus symbolique et narrative par l'utilisation d'une métaphore visuelle, dont les mouvements traduiraient l'état de la consommation du foyer. L'ajout de ce mouvement, couplé directement aux données collectées, donnerait au dispositif les caractéristiques propres d'une TUI, c'est-à-dire un retour physique et interprétable immédiatement, intégré à l'environnement quotidien.

La *Calm Technology* viendrait compléter cet ensemble en garantissant que cette présence physique reste discrète, non intrusive et modulée selon la pertinence du signal.

Ces trois dimensions, combinées, orientent la conception vers :

- Utiliser une métaphore visuelle tangible pour traduire instantanément l'état énergétique du foyer.
- Renforcer la dimension symbolique et narrative de la visualisation par le mouvement et le couplage direct aux données réelles.
- Assurer une présence physique continue mais discrète afin de maintenir la sensibilisation sur la durée sans gêner le quotidien.

3.4 Analyse comparative des projets existants

L'analyse comparative vise à identifier les forces et limites de projets existants intégrant une visualisation physique de données, afin d'en extraire les éléments transposables à la conception du dispositif envisagé.

3.4.1 Matrice comparative

La matrice positionne chaque projet étudié selon deux axes : la nature de l'interaction (passive à active) et la modalité de représentation (symbolique à analytique). Les *clusters* de couleur permettent de visualiser les regroupements de projets aux caractéristiques similaires. Les *clusters* rouge et violet, situés en bas de la matrice, correspondent aux dispositifs les plus pertinents pour une sensibilisation passive et continue.

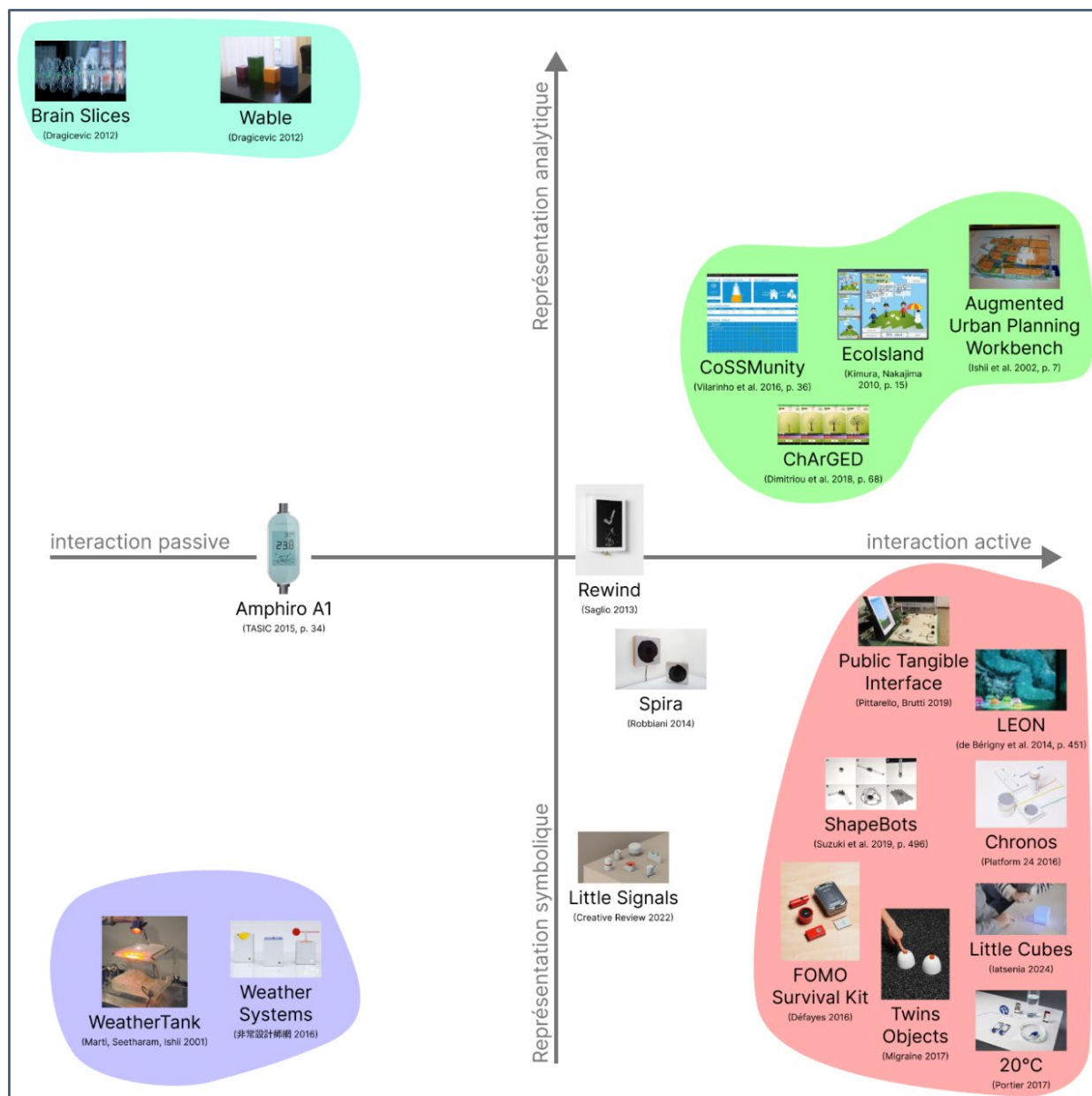


Figure 10 – Matrice comparative de projets d'interfaces tangibles selon la nature de l'interaction (passive ou active) et la modalité de représentation (symbolique ou analytique).

Sources : Amphiro A1 : (35, p. 34), Augmented Urban Planning Workbench : (36, p. 7), ChArGED : (24, p. 68), CoSSMunity : (37, p. 36), Public Tangible Interface : (38), Chronos : (39), LEON : (40, p. 451), Wable : (28), ShapeBots : (41, p. 496), 20°C : (42), Rewind : (43), Weather Systems : (44), Dyne Modular System : (45), Little Signals : (46), Twins Objects : (47), WeatherTank : (48), Little Cubes : (49), FOMO Survival Kit : (50), Brain Slices : (51), Ecoland : (52, p. 15), Spira : (53).

3.4.2 Conclusion et positionnement

L'analyse montre que les dispositifs les plus efficaces pour une sensibilisation durable, *clusters* rouge et violet (bas de la matrice), combinent :

- Un retour d'information persistant et intégré dans l'environnement, afin de maintenir l'attention sur la durée.
- Une dimension symbolique forte, permettant de créer un lien émotionnel avec l'utilisateur.
- Un alignement avec les principes de la *Calm Technology*, pour assurer la discrétion et la non-intrusion du dispositif.

Les projets purement interactifs, tels que ReacTable (33), présentent un fort potentiel ludique mais ne répondent pas pleinement aux objectifs de sensibilisation passive et continue recherchés dans ce Travail de Bachelor. À l'inverse, les projets intégrant des signaux physiques persistants et une métaphore claire, comme Little Signals (54), constituent des références particulièrement pertinentes pour orienter la conception.

3.5 Synthèse : Revue documentaire et positionnement

Cette synthèse rassemble les résultats clés du chapitre 3 et établit les critères de conception jugés essentiels à la réussite du dispositif. Ces critères guideront l'ensemble des décisions de design et de développement.

- **Rendre visible un phénomène non perceptible à l'œil nu (consommation numérique)**
Cause : l'impact énergétique du numérique est invisible pour l'utilisateur.
Apport : permet de matérialiser cet impact et d'en faciliter la prise de conscience.
- **Utiliser une métaphore physique pour représenter l'état énergétique**
Cause : les représentations symboliques sont plus facilement mémorisées et comprises.
Apport : offre une lecture universelle, compréhensible sans connaissances techniques.
- **Assurer un retour d'information continu dans l'environnement**
Cause : un signal ponctuel est vite oublié et perd son effet sur le comportement.
Apport : maintient la sensibilisation à long terme et encourage un suivi régulier.
- **Maintenir un dispositif discret**
Cause : un signal trop intrusif devient gênant et conduit à un rejet du dispositif.
Apport : garantit une intégration harmonieuse dans le quotidien.
- **Permettre une lecture instantanée et intuitive**
Cause : un effort cognitif élevé réduit l'attention et l'intérêt de l'utilisateur.
Apport : assure une interprétation rapide et efficace de l'information.
- **Lier directement les signaux physiques aux données mesurées**
Cause : des signaux non corrélés aux données réelles perdent leur crédibilité.
Apport : augmente la fiabilité perçue et la pertinence du dispositif.
- **Favoriser l'engagement par une dimension émotionnelle**
Cause : l'émotion est un levier puissant pour initier et maintenir un changement comportemental.
Apport : crée un lien affectif entre l'utilisateur et le dispositif, renforçant l'adhésion.

Chapitre 4

Approche méthodologique

L'organisation générale de ce Travail de Bachelor repose sur une structure en cascade (*waterfall*) pour la planification globale. Ce choix permet de définir des jalons clairs, de séquencer les grandes étapes (pré-étude, conception, prototypage, tests, finalisation) et de maintenir une gestion rigoureuse du temps. Cette approche convient particulièrement au contexte académique, où les échéances et livrables sont fixes.

Cependant, la conception d'une interface tangible requiert un mode opératoire plus souple et adaptatif. Pour cette partie du projet, la planification *waterfall* est complétée par un cycle itératif inspiré du *Research through Design* (RtD) (55, 56). Ce cycle permet d'alterner phases de conception, de développement et d'évaluation, afin d'affiner la solution au fil des tests et retours utilisateurs.

Ce double cadre méthodologique assure à la fois la prévisibilité nécessaire à la gestion globale et la flexibilité indispensable à la conception d'un objet interactif innovant.

4.1 Research through Design (RtD)

Le concept de RtD trouve ses origines dans les travaux de Frayling (55), qui le définit comme un mode d'enquête où le processus de conception produit lui-même des connaissances. Initialement formulé dans le champ de l'art et du design, ce cadre méthodologique a été progressivement adopté et adapté dans les domaines de l'interaction homme-machine et du design de TUIs, où il permet d'aborder des problématiques complexes par l'expérimentation et la création de prototypes.

Le présent travail adopte une approche RtD pour la phase de conception et de prototypage de l'interface tangible. Cette méthode est particulièrement adaptée aux problématiques dites *wicked problems* (57), dans lesquelles la solution ne peut être prédéterminée. Elle repose sur l'idée que la conception de prototypes et leur évaluation dans des contextes réels constitue un moyen de produire des connaissances contextualisées et actionnables (56, 58).

Dans le cadre de ce projet, la nature émergente de l'objet étudié, à savoir une interface tangible destinée à visualiser l'impact énergétique du numérique au sein d'un foyer, rend difficile l'application exclusive de méthodes expérimentales linéaires. L'approche RtD permet ainsi d'alterner conception, réalisation et réflexion critique, chaque itération enrichissant la compréhension du problème et affinant la solution proposée (56).

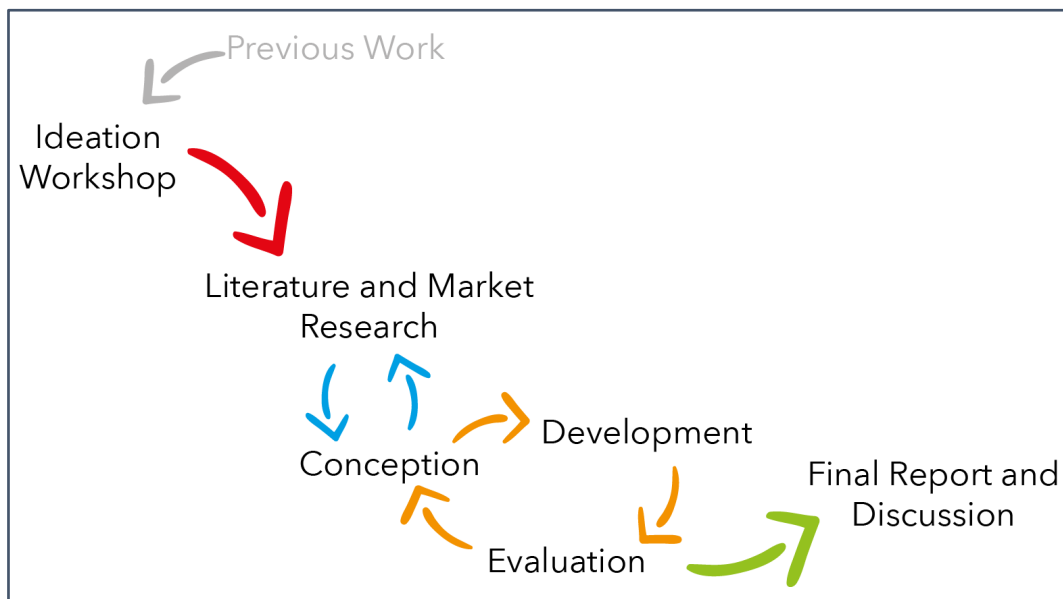


Figure 11 – Processus itératif de conception basé sur le *Research through Design* (56, p. 24).

Le processus suivi s'inspire directement du modèle itératif décrit par Dudo (56, p. 24). Il se structure en trois grandes phases :

- Conceptualisation : formulation des hypothèses et objectifs, revue de littérature, analyse des données existantes et atelier d'idéation.
- Développement : production de prototypes, du modèle basse fidélité au prototype fonctionnel intégrant l'électronique et la communication avec l'API.
- Évaluation : tests utilisateurs, analyse qualitative des retours et intégration des ajustements.

4.2 Méthodes de prototypage

Le prototypage a occupé une place centrale dans la démarche de conception, conformément aux principes de RtD. Il a permis de matérialiser rapidement des idées, de tester leur faisabilité et de recueillir des retours qualitatifs à chaque itération.

Dans ce projet, deux niveaux de prototypes ont été développés, chacun ayant un rôle spécifique dans la progression :

- Basse fidélité : Les premiers modèles ont été produits pour représenter de manière simple les concepts issus de l'idéation. L'objectif principal était de permettre une manipulation physique et de confronter les idées aux retours des utilisateurs dès les premières étapes. Ces prototypes ont facilité la comparaison des concepts et guidé la sélection de la solution à développer.
- Haute fidélité : Le prototype fonctionnel final a intégré l'ensemble des composants mécaniques et électroniques, reproduisant fidèlement les interactions prévues. Il avait pour but de valider l'expérience utilisateur dans un contexte proche de l'usage réel et de détecter d'éventuels problèmes avant toute finalisation.

L'impression 3D a été l'outil principal pour la production de ces prototypes. En phase initiale, elle a permis de créer rapidement des modèles manipulables afin d'évaluer proportions, ergonomie et intégration technique. En phase finale, elle a facilité l'itération sur la solution retenue, en intégrant les ajustements nécessaires et en résolvant les contraintes liées à l'assemblage et à la structure.

Ce choix méthodologique s'explique par la rapidité d'itération qu'offre l'impression 3D et par la possibilité de modifier ou reproduire facilement une pièce. Il a soutenu un enchaînement continu de phases de construction, suivi de tests, puis d'amélioration, garantissant une convergence progressive vers le prototype final.

Les prototypes ainsi produits ont constitué la base matérielle des sessions de recherche utilisateur, permettant d'évaluer la pertinence des concepts et l'efficacité des interactions dans des conditions contrôlées ou proches de l'usage réel.

4.3 Recherche utilisateur

La recherche utilisateur a été un pilier de la démarche RtD, servant à confronter les hypothèses de conception aux retours du public cible et à orienter les itérations suivantes. Elle visait à évaluer :

- la pertinence des concepts proposés
- la compréhension des signaux visuels et mécaniques
- la facilité d'interprétation des informations affichées.

Deux campagnes de tests ont été organisées :

1. Prototypes basse fidélité : validation des idées issues de l'idéation et orientation du choix du concept final (cf. Annexe 7).
2. Prototype fonctionnel haute fidélité : évaluation dans un contexte proche de l'usage final, avec intégration complète de l'électronique et de la programmation (cf. Annexe 18).

Les participants ont été sélectionnés pour correspondre au profil d'utilisateur final visé par le projet. Un *briefing* initial leur a présenté l'objectif du test sans orienter leurs réponses, conformément aux bonnes pratiques de Nielsen (59) et Rubin & Chisnell (60).

Les méthodes employées relevaient principalement de l’observation directe, de la discussion ouverte et de la collecte de verbatims. Ces techniques qualitatives, également mises en avant par Følstad (61) pour leur capacité à révéler des *insights* riches dans des contextes exploratoires, ont permis d’identifier les points de friction, de mesurer la clarté des signaux et de valider l’ergonomie générale du dispositif.

Les résultats ont été synthétisés et traduits en ajustements concrets sur le prototype. Ce processus a assuré la cohérence entre attentes des utilisateurs, contraintes techniques et objectifs initiaux, et a permis d’optimiser l’expérience proposée avant la phase finale du projet.

4.4 Séquences de recherche

Le déroulement du projet s’est articulé autour de plusieurs séquences méthodologiques, chacune associée à des objectifs précis, des méthodes définies et des livrables documentés. Le tableau ci-dessous présente la synthèse de ces étapes.

Séquence	Objectifs	Méthodes employées	Annexes	Finalité
Workshop	Définir le cadre du projet et cerner le problème	Atelier d’idéation collaboratif	19	Poser les bases du projet et identifier les premières pistes
Idéation	Explorer et préciser des concepts potentiels	Technique « How Might We », notes manuscrites, croquis	1, 2	Générer des concepts et documenter les idées
Prototypage basse fidélité	Donner forme aux concepts pour les évaluer rapidement	Modélisation 3D simple, impression 3D, tests utilisateurs	3 à 7	Comparer les concepts et sélectionner celui à développer
Prototypage haute fidélité	Développer un prototype complet intégrant mécanique et électronique	Modélisation 3D avancée, intégration des composants, tests utilisateurs finaux	8 à 18	Valider l’ergonomie et les interactions dans un contexte proche de l’usage final

Tableau 1 – Séquences de recherche du projet

4.5 Synthèse

La méthodologie adoptée dans ce projet a combiné la rigueur d’une planification *waterfall* pour structurer les grandes étapes et la flexibilité d’un cycle itératif inspiré de la RtD pour explorer, tester et affiner la solution. Cette hybridation a permis de maintenir un cap clair tout en laissant la place à l’expérimentation et à l’adaptation continue.

Chaque séquence méthodologique a joué un rôle spécifique : l’idéation a ouvert le champ des possibles, le prototypage basse fidélité a permis de confronter rapidement les concepts aux retours d’utilisateurs, et le prototypage haute fidélité a validé les choix techniques et ergonomiques dans des conditions proches de l’usage final. Ce cheminement a assuré une progression logique, de l’exploration initiale à la consolidation d’une solution robuste et pertinente.

La recherche utilisateur, intégrée à deux moments clés du processus, a apporté des *insights* décisifs pour orienter les itérations. Elle a permis non seulement de confirmer certaines hypothèses, mais aussi d’identifier des améliorations à apporter à la forme, aux interactions et à la compréhension des signaux visuels et mécaniques.

Cette approche méthodologique a montré sa force dans la capacité à faire évoluer le projet en réponse aux observations, mais elle a aussi révélé certaines limites : le nombre restreint de participants aux tests et le temps disponible pour les itérations finales ont réduit la possibilité d’explorer davantage de variantes. Ces contraintes ouvrent la voie à des perspectives d’amélioration, notamment par l’augmentation de l’échantillon de testeurs ou l’expérimentation de formats d’évaluation complémentaire.

Chapitre 5

Processus de design itératif

Ce chapitre documente le cheminement de conception ayant permis de passer d'un besoin initial à une solution concrète.

Il s'appuie sur une approche itérative, relevant d'une logique de type RtD, combinant phases d'idéation, de prototypage et de tests utilisateurs. Cette démarche a permis de faire émerger progressivement une solution tangible en s'appuyant sur des allers-retours entre hypothèses de conception, expérimentations concrètes et retours terrain.

5.1 Phase d'idéation

Le projet a débuté par un atelier d'idéation mené en phase de pré étude. L'objectif était de transformer une problématique abstraite, à savoir l'impact énergétique du numérique, en idées concrètes et tangibles, directement mobilisables pour la première itération de prototypage.

Pour structurer la réflexion, un ensemble de *Points of View* (POV) et de questions *How Might We* (HMW) a été élaboré spécifiquement pour cet exercice. Ces outils ont permis d'orienter la créativité vers des pistes ancrées dans des situations réelles d'usage, tout en stimulant l'exploration de formes interactives variées.¹

5.1.1.1 Séquence et observations

Le *workshop* a suivi une structure rythmée, alternant phases de présentation, production d'idées et sélection collective.

Durée	Étape / Activité	Observations
20 min	Présentation du contexte du projet, des enjeux environnementaux et des interfaces tangibles	La vulgarisation des notions de TUI a pris plus de temps que prévu afin d'assurer une compréhension de la part des participants
10 min	Présentation des POV et HMW	Ces éléments ont permis de cadrer l'idéation, mais les participants étaient peu familiers avec le tangible
10 min	Crazy 8s : chaque participant-e esquisse 8 idées en 8 minutes avec tournus des feuilles	Méthode efficace pour générer un grand volume d'idées, mais plusieurs participants sont restés centrés sur des interfaces avec écrans
10 min	Solution Sketch : développement individuel d'une idée	Les concepts se sont précisés, mais la durée courte a limité leur approfondissement
10 min	Discussion et vote des deux concepts les plus prometteurs	Concepts retenus : Personnage attachant (engagement émotionnel) et Sablier (métaphore temporelle claire)
—	Contraintes générales	Durée totale limitée à ~1h15, problème d'impression du matériel (présentation via beamer), participants peu familiers avec le tangible

Tableau 2 – Déroulement du workshop et observations associées.

¹ Les HMW et POV utilisés lors de cet atelier ne correspondent pas à ceux présentés dans l'Annexe 1. Cette annexe rassemble une version retravaillée après l'atelier, intégrant les enseignements de la recherche documentaire, et qui a servi de base à la suite du processus de conception (cf. section 5.2.2).

5.1.1.2 Résultats du workshop

Quatre propositions principales ont émergé : Papillons, Tableau décoratif, Personnage attachant et Sablier.

Après discussion et vote, deux concepts ont été retenus pour la suite :

- **Personnage attachant** : un petit personnage dont l'environnement visuel se dégrade ou s'améliore selon la consommation numérique. Son fort potentiel narratif et émotionnel a été reconnu comme un levier efficace pour inciter à des comportements plus sobres.
- **Sablier** : un objet physique représentant la consommation par un écoulement de sable plus ou moins rapide, illustrant la vitesse à laquelle le budget énergétique du foyer se « vide ». Sa métaphore simple et universelle a été jugée claire et impactante.

Ces deux concepts ont servi de point de départ pour la phase d'idéation approfondie.

5.1.1.3 Discussion critique

Il aurait été pertinent d'impliquer des experts en TUIs ou en design de produit pour enrichir l'atelier. Cette option n'a pas pu être envisagée en raison des contraintes de temps propres au Travail de Bachelor. Néanmoins, l'atelier a offert une ouverture créative précieuse, difficile à atteindre seul.

5.1.2 Idéation approfondie

La phase d'idéation s'est appuyée sur les résultats du *workshop* comme point d'ouverture. Les concepts produits ont été évalués au regard des lignes directrices définies par la recherche documentaire.

Seules les pistes respectant ces critères et présentant un potentiel de faisabilité ont été conservées. Par exemple, l'attache émotionnelle forte du « Personnage attachant » a été intégrée comme élément central dans certaines pistes, en cohérence avec les principes du *nudging* et de l'appropriation utilisateur.

5.1.2.1 How Might We (HMW)

Les HMW ont été retravaillées après le *workshop* pour intégrer les enseignements de la recherche documentaire et mieux cadrer la réflexion. Elles ont été regroupées en six axes thématiques :

1. **Visualisation des données énergétiques**
Comment pourrions-nous représenter visuellement les impacts énergétiques de manière intuitive et engageante ?
2. **Sensibilisation et changement comportemental (*nudging*)**
Comment pourrions-nous inciter à réduire la consommation numérique sans générer de culpabilité ?
3. **Interface tangible et interaction utilisateur**
Comment pourrions-nous rendre l'interface tangible agréable à manipuler au quotidien ?
4. **Data *physicalization* et visualisation ambiante**
Comment pourrions-nous matérialiser des données abstraites via des formes ou mouvements ?
5. **Interaction entre numérique et tangible**
Comment pourrions-nous assurer la cohérence entre la version tangible et la version numérique ?
6. **Personnalisation et appropriation**
Comment pourrions-nous permettre à chacun-e de personnaliser l'objet pour renforcer son attachement ?

La liste complète des HMW retravaillées figure dans l'Annexe 1.

5.1.2.2 Outils d'idéation utilisés

Pour alimenter la créativité, plusieurs techniques complémentaires ont été mobilisées :

- *Freewriting* : génération rapide d'idées sans autocensure pour maximiser la diversité des pistes.
- *Doodle picture / Sketch* : croquis rapides pour matérialiser les idées.
- *Mindmap* / association de mots : organisation des concepts et exploration de liens inattendus.

Certaines approches proches de la méthode SCAMPER ont été appliquées de manière intuitive comme rappel à penser *out of the box*, sans suivre la procédure complète de manière formelle.

5.1.2.3 Discussion critique

La combinaison des HMW retravaillées, des *guidelines* issues de la recherche documentaire et des outils d'idéation visuels a permis de générer un ensemble d'idées cohérentes et originales.

Les HMW ont assuré un alignement constant avec les objectifs du projet, tandis que les techniques libres ont ouvert la voie à des solutions.

Si le temps limité a freiné l'approfondissement de certaines pistes, cette phase a néanmoins fourni une base solide et directement exploitable pour initier la première itération de prototypage.

5.1.3 Idées retenues

À l'issue du workshop et de l'idéation approfondie, deux concepts se sont distingués par leur pertinence au regard des objectifs du projet, leur faisabilité technique et leur potentiel d'impact émotionnel. Ces deux propositions ont été sélectionnées pour la première itération de prototypage basse fidélité, afin d'être comparées lors de tests utilisateurs.

5.1.3.1 Personnage du numérique (cf. Annexe 3)

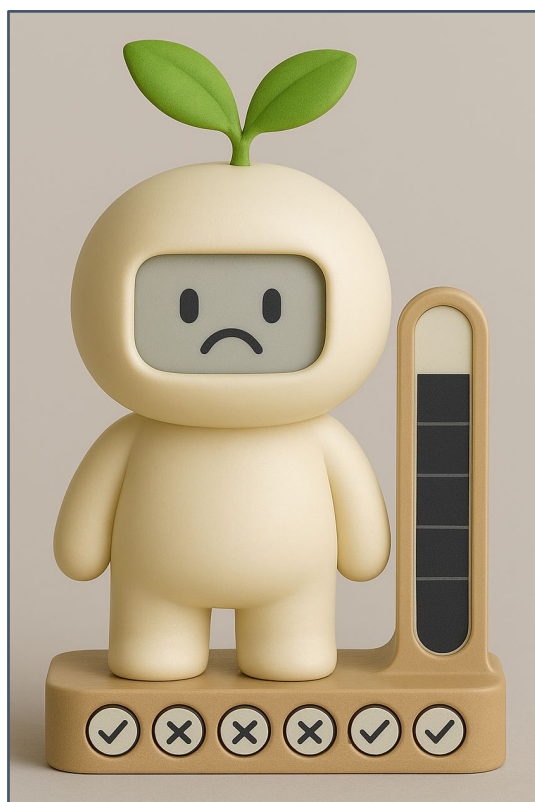


Figure 12 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents.

Après plusieurs itérations, des ajustements ont été demandés pour :

- intégrer une paire de feuilles au sommet du personnage,
- représenter la jauge verticalement,
- transformer l'historique en une série de ronds affichant coche ou croix comme sur de petits écrans e-Ink.
- adapter la couleur de la base (socle brun clair) pour détacher visuellement le personnage du support.

[Image générée le 4 juin 2025]

Ce concept prend la forme d'un petit personnage expressif, inspiré des figurines Smiski (62). Il combine trois éléments principaux : un visage animé via un écran E-Ink, une jauge quotidienne indiquant la consommation par rapport à un seuil, et un historique sur plusieurs jours. L'approche vise à créer un lien affectif fort grâce à l'expressivité du personnage, tout en fournissant des repères visuels clairs sur l'état de la consommation. La conception repose sur les principes du *nudging* émotionnel et de la *Calm Technology*, cherchant à informer sans intrusion tout en renforçant l'engagement des usagers. Deux variantes techniques ont été explorées : l'une avec une jauge mécanique à aiguille animée par un servo-moteur, et l'autre avec un second écran E-Ink combinant jauge et historique.

5.1.3.2 Fleur qui fane (cf. Annexe 4)



Figure 13 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est droite, avec une tige verte rigide, une tête plate composée de pétales blancs et d'un centre jaune, le tout dans un pot en terre cuite sur une table en bois clair, fond beige.

Objectif : représenter l'état "fleur en bonne santé" du concept fleur qui fane développé dans le cadre du TB.

[Image générée le 11 juin 2025]

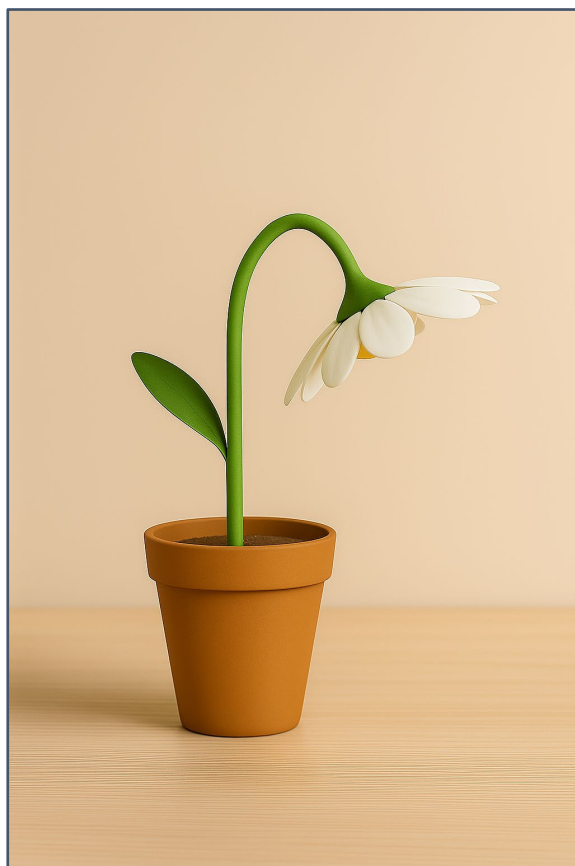


Figure 14 – Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas, exprimant un état d'alerte ou de surconsommation. Le pot en terre cuite est posé sur une table en bois clair, avec un fond beige lisse.

Objectif : représenter l'état "fleur fanée" du concept fleur qui fane, développé dans le cadre du TB.

[Image générée le 11 juin 2025]

Cette idée repose sur une métaphore naturelle et universelle : l'état de santé d'une fleur comme reflet de la consommation numérique du foyer. Lorsque celle-ci reste dans des limites sobres, la fleur est droite et épanouie. En cas de surconsommation, la tige se courbe progressivement, simulant un état de fanaison. Ce retour visuel simple et émotionnel repose sur un *mapping* direct entre la donnée mesurée et la posture de l'objet. Le concept privilégie une sensibilisation douce, perceptible en périphérie de l'attention, et respecte les principes de *Calm Technology*. Une LED discrète intégrée au centre de la fleur peut signaler ponctuellement des pics de consommation, et l'ajout optionnel d'un écran E-Ink sous forme d'étiquette de jardin pourrait compléter la lisibilité.

Ces deux concepts ont été retenus pour leur capacité à traduire la consommation numérique en un signal tangible et émotionnel, tout en s'intégrant harmonieusement dans un environnement domestique. Leur comparaison en situation de test devait permettre d'identifier lequel répond le mieux aux objectifs du projet et servir de base à l'itération suivante.

5.2 Première itération : prototypes basse fidélité

5.2.1 Objectifs

L'objectif initial de cette première itération était de sélectionner, à l'issue de la phase d'idéation, une idée unique parmi les deux propositions, en concertation avec le mandant et l'enseignant responsable. Cette idée devait ensuite servir de base à la réalisation d'un prototype basse fidélité, conçu en papier, carton ou impression 3D, afin de tester son alignement avec les objectifs du projet et de recueillir des retours utilisateurs pour orienter l'itération suivante.

Lors de la réunion prévue pour arrêter ce choix, les deux concepts les plus prometteurs issus de l'idéation, présentés dans la section 5.2.3 (Personnage du numérique, cf. Annexe 3, et Fleur qui fane, cf. Annexe 4), ont été jugés suffisamment pertinents et réalisables pour être comparés. Le mandant et l'enseignant ont proposé de baser la sélection finale sur les résultats d'un test utilisateur comparatif plutôt que sur une décision arbitraire. L'objectif de cette itération a donc évolué. Il ne s'agissait plus de prototyper et d'itérer sur une seule idée, mais de développer deux prototypes basse fidélité distincts afin de les confronter dans un même protocole d'évaluation.

Cette itération s'inscrivait dans une démarche exploratoire de type RtD, centrée sur la lisibilité de la métaphore et l'ergonomie de l'objet avant tout investissement dans des développements techniques.

En comparant deux approches tangibles très différentes, l'une anthropomorphique et l'autre inspirée de la nature, cette première itération devait permettre de déterminer laquelle répondait le mieux aux objectifs initiaux du projet, tout en fournissant une base solide pour le développement du prototype fonctionnel.

5.2.2 Concepts

L'objectif n'était pas de reproduire les versions complètes et fonctionnelles de ces idées, mais de créer des prototypes basse fidélité capables de préserver les éléments fondamentaux de chaque concept. Ces éléments constituaient le cœur de leur identité et devaient impérativement être conservés afin de tester leur lisibilité, leur impact émotionnel et leur ergonomie.

Pour le Personnage du numérique, l'élément central était la conservation de sa forme et de son esthétique anthropomorphique, proches du concept de base. Cette dimension devait permettre aux participants de ressentir, ou non, un lien affectif avec le prototype. Un autre aspect essentiel consistait à matérialiser les trois interfaces de données prévues dans le concept initial, chacune correspondant à un écran E-Ink dans la version complète. Cette représentation physique devait permettre d'évaluer leur compréhension et leur appropriation par les participants, même sans fonctionnalité active.

Pour la Fleur qui fane, il était prioritaire de lui donner une apparence immédiatement identifiable comme une fleur, sans effort cognitif de la part des participants. Plus cette reconnaissance serait intuitive, plus le rappel émotionnel lié à la nature pourrait être ressenti. Le second point clé était la capacité de la fleur à se faner, grâce à un mécanisme permettant de faire fléchir la tige. Cette fonctionnalité, même simplifiée, devait offrir une première évaluation de la faisabilité technique, considérée comme un point critique de cette idée.

Ces choix ont permis de concevoir des prototypes centrés sur la matérialisation du message principal et des leviers émotionnels propres à chaque concept, tout en écartant volontairement les aspects techniques complexes pour se concentrer sur ce qui devait être évalué en priorité.

5.2.3 Prototypage

Cette section décrit le processus de réalisation des prototypes basse fidélité développés pour la première itération, en suivant les intentions définies au 5.3.2 et les objectifs fixés au 5.3.1. L'objectif principal était de traduire les éléments essentiels de chaque concept dans une forme tangible, suffisamment fidèle pour évaluer leur lisibilité, leur impact émotionnel et leur ergonomie, tout en restant adaptée aux contraintes de temps et de moyens propres au Travail de Bachelor.

Chaque choix de conception et de fabrication est présenté avec sa justification et mis en lien direct avec les objectifs de l'itération.

Les sections suivantes détaillent les choix de matériaux, les méthodes de fabrication et les adaptations effectuées pour chacun des prototypes, ainsi que les contraintes rencontrées et les ajustements réalisés pour garantir la validité des tests utilisateurs.

5.2.3.1 Personnage du numérique

Le prototype du Personnage du numérique a été réalisé en impression 3D à partir du concept initial, en conservant des proportions fidèles et une esthétique anthropomorphique pour préserver le potentiel de lien affectif avec les participants. Le modèle a été imprimé en plusieurs pièces afin de faciliter l'assemblage et optimiser la qualité de fabrication. Le fichier du modèle 3D est disponible en Annexe 5 pour référence.



Figure 15 – Photographie du prototype basse fidélité du Personnage du numérique.

Les trois emplacements prévus pour les écrans E-Ink dans le concept final ont été matérialisés à l'échelle exacte par des extrusions intégrant des fentes. Celles-ci permettaient d'insérer des feuilles imprimées représentant différents états d'affichage, afin de simuler les interfaces de données et d'évaluer leur compréhension et leur appropriation par les utilisateurs.

Certaines simplifications ont été apportées afin de respecter les contraintes de temps et de moyens, mais sans compromettre les éléments essentiels à tester.

5.2.3.2 Fleur qui fane

Le prototype de la Fleur qui fane a été conçu pour répondre à deux objectifs principaux : valider la faisabilité mécanique de la fanaison et tester l'impact visuel et émotionnel de la métaphore naturelle. Les dimensions et proportions retenues sont proches du concept initial, bien que la base intégrant le pot n'ait pas été réalisée à ce stade. L'ensemble des pièces a été imprimé en PLA, avec un capitule rouge en raison des contraintes de disponibilité de matériau, ce qui n'a pas compromis la reconnaissance de l'objet comme fleur. Le fichier du modèle 3D est disponible en Annexe 6 pour référence.



Figure 16 – Photographie du prototype basse fidélité de la Fleur qui fane en position verticale lorsque le câble est tendu.

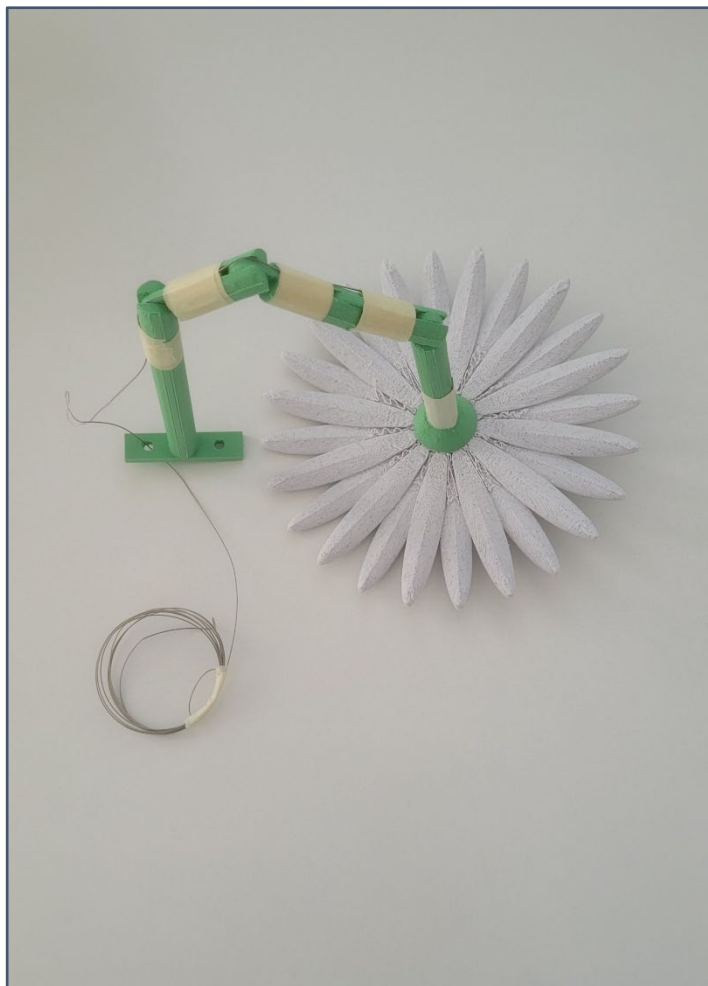


Figure 17 – Photographie du prototype basse fidélité de la Fleur qui fane en position inclinée simulant la fanaison lorsque le câble est relâché.

La structure du prototype comprenait la base de la tige, des segments articulés, la tige supérieure avec la base de la tête, les pétales et le capitule (centre de la fleur). Les pétales, inspirés d'une marguerite, se sont révélés trop lourds pour cette version, constituant un point d'apprentissage important pour la suite.

L'idée initiale pour le mécanisme de fanaison reposait sur une tige creuse, capable de se courber tout en restant suffisamment rigide pour ne pas plier sous le poids de la fleur. Une tige mécanique interne à ce tube permettrait en position haute dans le tube de maintenir la tige droite, ou en position basse, rentrée dans le pot, de la faire courber. Ce choix devait permettre à la fleur de s'incliner sous son poids lorsque la tige interne se rétractait, puis de revenir droite lorsqu'elle était remise en position haute.

Après plusieurs tentatives infructueuses pour trouver un matériau de tube offrant à la fois la flexibilité et la rigidité nécessaires, une solution alternative a été retenue : une tige pleine imprimée en 3D, avec un câble longeant l'un de ses côtés. Lorsque le câble était tendu, la fleur restait droite ; lorsqu'il se relâchait, elle s'inclinait du côté opposé, simulant ainsi la fanaison. Dans ce prototype basse fidélité, le câble était fixé à l'extérieur et actionné manuellement, constituant un simple *Proof of Concept* (PoC) du mouvement.

5.2.4 Évaluation

L'évaluation de cette première itération avait pour objectif de comparer les deux prototypes basse fidélité développés : Personnage du numérique et Fleur qui fane. L'enjeu principal était de déterminer lequel de ces concepts répondait le mieux aux objectifs définis au 5.3.1, à savoir la lisibilité de la métaphore, l'impact émotionnel et l'ergonomie de l'objet. Cette comparaison devait permettre d'orienter la sélection du concept à développer pour le prototype fonctionnel de la deuxième itération. Le rapport complet de ce test utilisateur, incluant le protocole détaillé, les grilles d'observation et les données brutes, est disponible en Annexe 7.

5.2.4.1 Méthodologie

Le protocole retenu s'appuie sur un test utilisateur coopératif tel que décrit par Følstad et Hornbæk (61), méthode particulièrement adaptée à l'évaluation de prototypes tangibles basse fidélité. Elle favorise un dialogue continu entre évaluateur et participant, permettant à ce dernier de commenter librement ses impressions, de poser des questions et de suggérer des améliorations en cours d'interaction. Cette approche facilite la détection de problèmes de compréhension ou d'ergonomie et enrichit la collecte d'*insights* qualitatifs.

Chaque session, d'une durée d'environ 45 minutes, s'est déroulée en présentiel dans une salle de test de la HEIG-VD, configurée pour minimiser les distractions et pour enregistrer précisément les observations, conformément aux recommandations de Rubin et Chisnell (60) concernant l'importance d'un environnement stable et contrôlé.

5.2.4.2 Participants

L'échantillon se composait de quatre participant-es, âgés de 21 à 43 ans (moyenne : 28,75 ans). Trois étaient étudiants en ingénierie des médias à la HEIG-VD, et un travaillait comme assistante d'institut. Tous déclaraient un usage numérique fréquent ($M = 4,06/5$). Trois disposaient de compétences techniques en design ou programmation, et un profil présentait un niveau plus basique, correspondant à un usage bureautique courant.

La sensibilité à l'impact écologique du numérique allait de faible à élevée. Deux participants se déclaraient modérément à fortement sensibles, deux autres moins concernés. Tous avaient déjà entendu parler des impacts environnementaux du numérique, mais seule une personne avait déjà modifié ses habitudes en conséquence. Un seul participant avait déjà utilisé un objet interactif, ce qui permettait de tester les prototypes auprès d'un public majoritairement non familier avec les TUIs.

Bien que Nielsen (59) recommande un échantillon idéal de cinq participants pour maximiser la détection des problèmes tout en optimisant le rapport coût/temps, le recrutement a été limité à quatre personnes en raison de contraintes de disponibilité. La diversité des profils a néanmoins permis de recueillir des retours qualitatifs variés et exploitables. La participation était volontaire et non rémunérée, motivée par l'intérêt pour le projet et l'envie de contribuer à un Travail de Bachelor.

5.2.4.3 Scénario de test

Le scénario était structuré en deux phases.

En phase 1, chaque participant interagissait séparément avec les deux prototypes. Pour chacun, deux étapes étaient réalisées :

1. Exploration libre sans explication préalable : observation des réactions initiales et de la compréhension spontanée de la métaphore et des éléments visibles.
2. Interaction guidée après explication : présentation du concept, des objectifs et de la logique d'utilisation, suivie d'une nouvelle manipulation et d'un retour éclairé sur la pertinence, la lisibilité et l'ergonomie.

L'ordre de présentation des prototypes a été alterné pour éviter un biais d'ordre.

En phase 2, les participants comparaient directement les deux concepts, en identifiant leurs préférences et en formulant des suggestions. Les tâches incluaient la manipulation physique, l'interprétation des éléments visuels et mécaniques, l'évaluation du confort d'usage et la proposition d'améliorations.

5.2.4.4 Données collectées

Trois types de données ont été combinés :

- Observations comportementales : gestes, hésitations, réactions spontanées, commentaires non sollicités.
- *Feedback* qualitatif : impressions exprimées librement pendant le test coopératif, permettant d'identifier ce qui était perçu comme intuitif ou déroutant.
- Mesures quantitatives : *Single Ease Question* (SEQ) à la fin de chaque tâche, et *System Usability Scale* (SUS) à la fin du test, administré globalement pour évaluer l'usabilité perçue d'une interface tangible de ce type.

Cette combinaison a permis de recueillir des retours immédiats et des évaluations globales réfléchies, offrant ainsi une base solide pour sélectionner et améliorer le concept retenu. L'ensemble des résultats détaillés et des relevés issus de cette collecte sont présentés dans le rapport complet disponible en Annexe 7.

5.2.5 Résultats et enseignements

L'évaluation individuelle a mis en évidence des dynamiques distinctes. Pour la Fleur qui fane, le score SEQ le plus élevé ($M = 5,5/7$) correspond à la tâche 1 (Sans explication, que comprends-tu de ce dispositif ?). Ce résultat confirme une compréhension intuitive : les participants associent spontanément la posture de la tige au niveau de consommation, avec une lecture simple où la tige droite signifie une consommation faible et la tige inclinée une consommation élevée. Lors des échanges, le concept de LED intégrée au centre de la fleur, prévu dans la version finale avec deux états de couleur (rouge et vert), a été interprété clairement. Plusieurs participants ont néanmoins exprimé le besoin d'ajouter une couleur intermédiaire pour affiner le retour. Le manque de nuances intermédiaires dans la position de la tige a également été relevé. Cette perception provenait du fait que le prototype basse fidélité ne permettait pas encore de montrer les états intermédiaires prévus dans la conception. L'impact émotionnel a été jugé fort et identifié comme un levier de sensibilisation, mais il devra être maîtrisé afin d'éviter un effet négatif si la fleur reste fanée trop longtemps.

Pour le Personnage du numérique, le meilleur score SEQ ($M = 6/7$) est obtenu à la tâche 3 (Après explication, donne-moi ton avis), signe qu'une fois expliqué, le concept est jugé clair et cohérent. À l'inverse, la tâche 2 (Que signifient les différentes parties du prototype ?) obtenant le score le plus bas ($M = 4,75/7$) montre que la lecture initiale des différentes parties reste limitée. L'historique et la jauge, situés dans le socle, ont été les éléments les moins bien compris lors de la première interaction. Le personnage a été perçu comme ludique, mais également comme plus gadget. Les participants ont exprimé un risque de désintéressement sur le long terme. L'absence de mouvement visible dans le concept final pourrait réduire son impact sur la durée auprès des habitants du foyer.

En comparaison directe, le personnage a été jugé plus lisible grâce à ses indicateurs explicites, qui délivrent des informations analytiques précises. La fleur, quant à elle, demande davantage d'interprétation. Cependant, cette dernière a suscité une réaction émotionnelle plus marquée. Voir la tige fanée déclenche une réaction immédiate. À l'inverse, le personnage est perçu comme plus informatif, mais moins engageant sur le plan affectif. Les préférences des participants se sont partagées. Plusieurs ont proposé une hybridation des approches, en combinant la lisibilité et la précision du personnage avec l'impact émotionnel de la fleur.

Le System Usability Scale, administré globalement à la fin du test, affiche un score moyen de $M = 81,9/100$. Il indique une usabilité jugée excellente et reflète un fort potentiel de l'usage d'une interface tangible pour visualiser sa consommation numérique.

L'analyse des problèmes identifiés corrobore ces observations. Pour la fleur, ils concernent :

- l'absence de nuances intermédiaires du mouvement de la tige,
- la confusion possible entre posture et LED,
- le risque de démotivation si l'état fané persiste.

Pour le personnage, les difficultés portent sur :

- la lecture peu claire de l'historique,
- la jauge jugée peu intuitive,
- L'écran perçu non pas comme un visage expressif, mais comme un support d'information analytique.

Ces éléments renforcent la pertinence de la Fleur qui fane pour la suite du projet. Son impact émotionnel fort, sa symbolique universelle et sa compréhension intuitive en font un choix aligné avec les principes de *Calm Technology*. Elle assure une visibilité continue et nécessite peu d'effort cognitif de la part de l'utilisateur. Le personnage conserve un avantage en lisibilité et en précision, mais son engagement émotionnel plus limité et son caractère plus gadget réduisent son potentiel comportemental.

Recommandations issues du test :

- Optimiser la plage et la segmentation de la fanaison.
- Définir clairement les signaux lumineux de la LED et leur cohérence avec la posture.
- Adopter un code couleur normalisé vert-orange-rouge pour la LED.
- Éviter les états fanés prolongés.
- Réinitialiser la fleur sur la base d'un cycle hebdomadaire.
- Explorer des enrichissements subtils, comme des variations de teinte ou de légers mouvements de pétales.

Enfin, la méthode de test coopérative s'est révélée particulièrement adaptée à cette première itération. En favorisant un dialogue entre participants et modérateur, elle a permis d'identifier non seulement les forces et faiblesses de chaque concept, mais aussi des attentes implicites. Ces apports orientent directement la conception du prototype fonctionnel de la deuxième itération.

5.3 Deuxième itération : prototype fonctionnel

5.3.1 Objectifs

La deuxième itération s'est appuyée sur la Fleur qui fane, concept retenu à l'issue de la première phase de tests. Rebaptisée Fleur numérique, cette version visait à aboutir à un prototype haute fidélité pleinement fonctionnel. L'objectif était d'intégrer l'ensemble des recommandations issues de l'itération précédente, tout en assurant la conception mécanique, l'intégration de l'électronique et le développement logiciel nécessaires pour reproduire le comportement final attendu.

Le dispositif devait simuler un usage réel à partir des données de consommation fournies par CarbonViz Home. Ce passage à une version haute fidélité représentait un défi technique important, notamment pour la réalisation d'un mécanisme de fanaison fiable, dont la faisabilité restait incertaine au lancement de l'itération. La production d'un prototype fonctionnel constituait donc un objectif majeur en soi.

Cette phase marquait l'entrée du projet dans sa réalisation concrète. Une fois finalisé, le prototype devait être soumis à des tests utilisateurs afin de valider son fonctionnement, d'évaluer son ergonomie et son impact, et de formuler des recommandations pour une éventuelle reprise du projet par le MEI.

5.3.2 Développement

5.3.2.1 Conception initiale et planification

La planification de cette deuxième itération reposait sur deux grandes étapes : concevoir le prototype complet, puis le réaliser. L'idée était de finaliser la conception afin de commander l'ensemble des composants nécessaires, puis d'assembler la fleur tout en corrigeant les problèmes rencontrés au fil de l'avancement. Dans les faits, conception et fabrication se sont souvent chevauchées. L'ensemble du processus a duré environ quatre semaines, soit plus que l'estimation initiale, qui s'est révélée trop optimiste au vu de la complexité du projet.

Afin de limiter les risques, le développement a commencé par les éléments les plus critiques avant de suivre un ordre logique :

1. Conception du mécanisme de fanaison pour valider la faisabilité technique du concept retenu.
2. Conception de l'électronique pour définir et préparer les composants nécessaires au contrôle de la tige et de la LED.
3. Conception mécanique des éléments de la fleur, avec modélisation des pièces et préparation pour l'impression et l'assemblage.
4. Production de la fleur en fabriquant et assemblant les différents éléments mécaniques et électroniques.
5. Programmation embarquée et création d'une interface de test pour contrôler le mécanisme et la LED et permettre les essais fonctionnels.
6. Réalisation de tests et itérations continues pour corriger les problèmes jusqu'à stabilisation du prototype.
7. Développement d'un programme de simulation pour reproduire l'usage de la fleur à partir des données CarbonViz Home.
8. Conception d'une interface de test spécifique pour les tests utilisateurs.

Au départ, peu de contraintes étaient figées, à l'exception du choix du microcontrôleur Adafruit Feather HUZZAH32 ESP32. Les dimensions générales du prototype basse fidélité ont servi de référence, mais sans contrainte stricte. La plupart des décisions ont été prises au fur et à mesure, en fonction des contraintes techniques et des opportunités de conception.

Certaines recommandations de la première itération ont été intégrées dès cette phase. Le mouvement de fanaison a été pensé pour offrir une impression analogique fluide, avec un servo suffisamment précis pour permettre des pas fins. Le choix d'une LED RGB a été confirmé afin de gérer plusieurs états lumineux, ce qui a imposé des contraintes pour le passage des câbles dans la tige. Enfin, l'amélioration du rendu visuel et la qualité des pétales sont restées des points d'attention, même si certaines idées proposées lors des tests initiaux se sont révélées irréalisables à ce stade.

5.3.2.2 Développement mécanique

La conception mécanique a débuté par l'élément le plus critique : le mécanisme de fanaison de la tige. Sans validation de cette partie, le concept même de la Fleur numérique aurait dû être abandonné. Les modélisations ont été réalisées sous Fusion 360, outil déjà utilisé lors de la première itération. Elles ont donné lieu à de nombreuses impressions test, l'impression 3D permettant d'itérer rapidement et de corriger les défauts détectés.

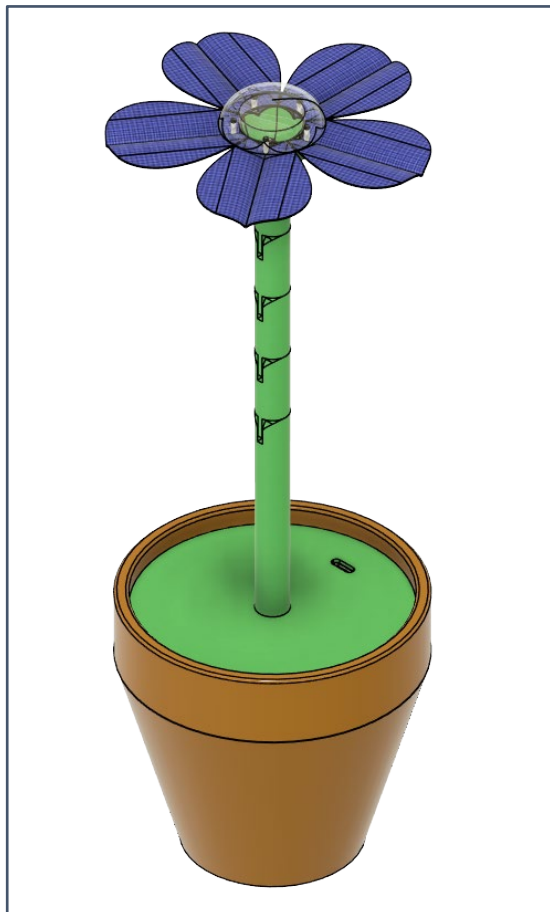


Figure 18 – Vue globale de la Fleur numérique en modèle 3D. Représentation complète du prototype final haute fidélité, montrant l'intégration de la tige, de la tête et du pot.

Le premier concept de tige reposait sur une impression en une seule pièce intégrant directement les articulations. Cette approche, choisie par manque d'expérience en impression 3D, s'est révélée trop fragile et imprécise. Elle a été remplacée par un système d'articulations reliées par des vis métriques M2, offrant une meilleure solidité et une précision accrue lors de l'assemblage. Ce changement a également facilité le démontage et les ajustements.



Figure 20 – Première version de la tige en une seule pièce imprimée en 3D. Prototype initial avec articulations intégrées, testé pour valider le M2. Conception améliorée offrant plus de robustesse, de précision et concept mais présentant des problèmes de solidité et de précision.

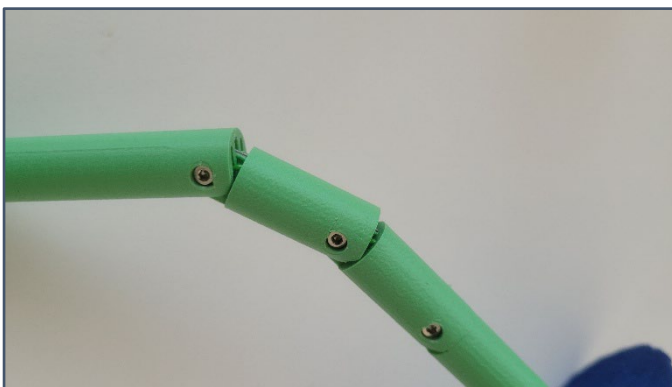


Figure 19 – Version finale de la tige avec articulations à vis métriques M2. Conception améliorée offrant plus de robustesse, de précision et facilitant l'assemblage et le démontage.

L'intégration des câbles a constitué un défi récurrent. La LED RGB nécessitant trois fils, leur passage dans une tige étroite a rapidement posé problème. Les premiers essais avec des câbles de *wrapping* très fins ont permis le passage mais, trop rigides, ils cassaient après quelques flexions. La solution retenue en fin de projet a consisté à élargir légèrement le passage interne de la tige pour accueillir des câbles plus flexibles, de type multibrin, tout en conservant une section réduite ($0,1 \text{ mm}^2$). Les itérations ont également permis d'ajuster les angles de rotation des articulations et de mettre en place des butées mécaniques limitant leur flexion à environ 45° .

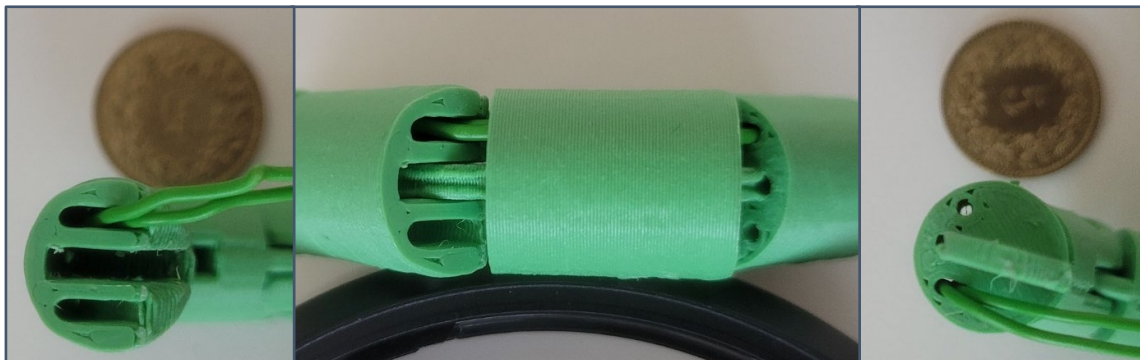


Figure 21 – Vue rapprochée montrant la contrainte d'espace et la solution retenue. Les trois images juxtaposées illustrent respectivement le passage des câbles en entrée, dans l'articulation et en sortie.

Une fois la tige fonctionnelle, le travail s'est porté sur la base. Le choix s'est porté sur un pot du commerce pour rappeler l'apparence d'une plante réelle. Une structure imprimée en PLA a été conçue pour s'intégrer à l'intérieur, en deux parties : la partie supérieure servant de base à la tige, et la partie inférieure accueillant les composants électroniques. Ce découpage facilitait l'impression et permettait de fixer solidement les éléments.

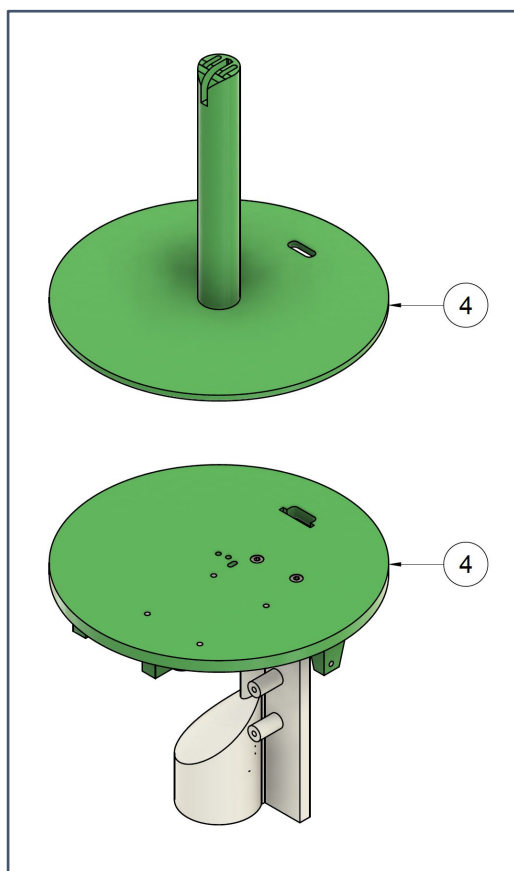


Figure 22 – Base en deux parties. Partie supérieure servant de support à la tige et partie inférieure accueillant les composants électroniques, conçues pour s'intégrer dans le pot.

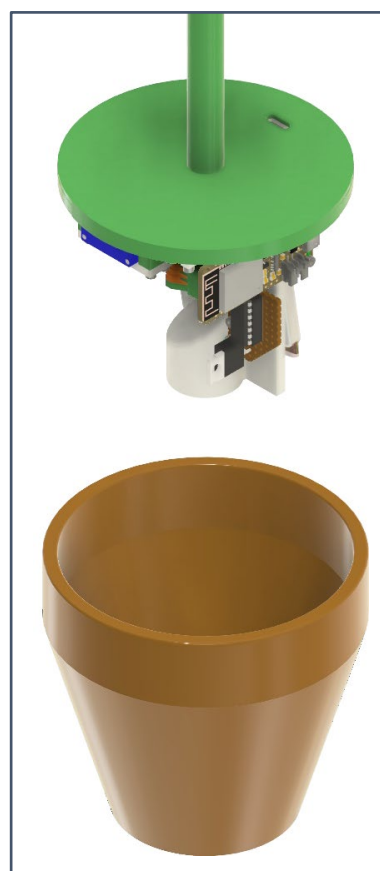


Figure 23 – Empotage en vue 3D. Schéma montrant l'assemblage de la base et des composants électroniques dans un pot de fleur du commerce.

La tête de la fleur a connu plusieurs versions. Elle devait accueillir la LED et s'assembler avec un capitule imprimé, les deux parties venant serrer les pétales. Ces dernières ont été réalisées en feutrine fine afin de réduire leur poids et d'éviter un rendu plastique. L'idée était que la forme en V à la base des pétales leur permette de rester droites lorsque la tige est verticale, et de se courber sous leur propre poids lorsque la fleur se fane. Ce principe n'a pas donné les résultats attendus, mais reste une piste à explorer avec d'autres matériaux ou un ajustement de la géométrie.

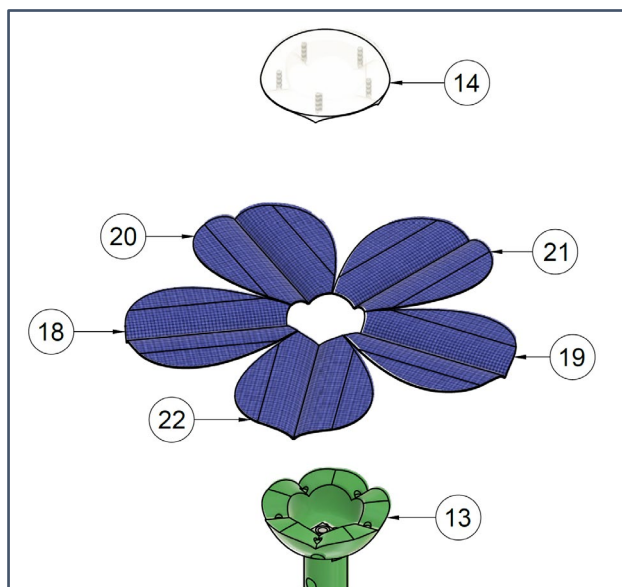


Figure 24 – Tête, pétales et capitule de la fleur en modèle 3D. Détail des éléments constituant la tête de la fleur, avec les pétales en feutrine et le capitule accueillant la LED RGB.

Le PLA a été retenu pour l'ensemble des pièces imprimées, principalement pour sa disponibilité au MEI et la facilité d'impression qu'il offre, ce qui est essentiel en phase de prototypage rapide. À terme, le choix pourrait s'orienter vers d'autres matériaux afin de réduire l'impact environnemental. La feutrine, quant à elle, a été choisie pour sa souplesse, son faible poids et son rendu visuel plus chaleureux, même si les résultats mécaniques n'ont pas été pleinement satisfaisants.

Référence du filament	Couleur / Finition	Type de matériau	Utilisation dans le prototype	Lien vers le fabricant
Polymaker PolyLite™ PLA Panchroma Matte	Forest Green, finition mate	PLA	Impression de la tige et d'éléments structurels visibles	Lien
Polymaker PolyLite™ PLA Panchroma Marble	Marble White, effet marbré	PLA	Impression des pétales (versions test) et supports	Lien
Purefil PLA Transparent	Transparent	PLA	Impression du capitule nécessitant un effet translucide et diffus pour la LED	Lien

Tableau 3 – Filaments utilisés pour l'impression 3D du prototype final.

Les validations mécaniques ont été menées en situation réelle plutôt que par des tests isolés. Plusieurs éléments ont ainsi été modifiés après défaillance, comme les supports du servomoteur, renforcés après casse. Les filetages M2 imprimés avec une buse de 0,4 mm se sont révélés fonctionnels, mais un taraudage manuel de finition a été systématiquement effectué pour réduire les contraintes mécaniques lors du vissage et prolonger la durée de vie des pièces.

Le modèle 3D du prototype final est disponible en annexe 08 et les fichiers de maillage correspondants en annexe 09. Le guide d'assemblage mécanique, détaillant pas à pas les opérations nécessaires à la construction de la Fleur numérique, est présenté en annexe 13.

5.3.2.3 Développement électronique

Le système électronique de la Fleur numérique repose sur un ensemble de composants choisis pour leur compatibilité avec un prototypage rapide, leur disponibilité et leurs performances dans un contexte d'objet connecté basse consommation.

L'architecture générale s'articule autour des composants principaux suivants :

N°	Composant principaux	Référence / Modèle
1	Microcontrôleur	Adafruit Feather HUZZAH32 ESP32
2	Servomoteur	Tower Pro MG90S
3	LED RGB	WS2812B
4	Step-up DC/DC	Purecrea MT3608
5	Porte logique AND	74HCT08
6	MOSFET	IRL540N
7	Batterie LiPo	3,7 V – 3500 mAh
8	Connecteur USB type C	Carte de dérivation prise USB Type C 4P

Tableau 4 – Composants principaux de la Fleur numérique.

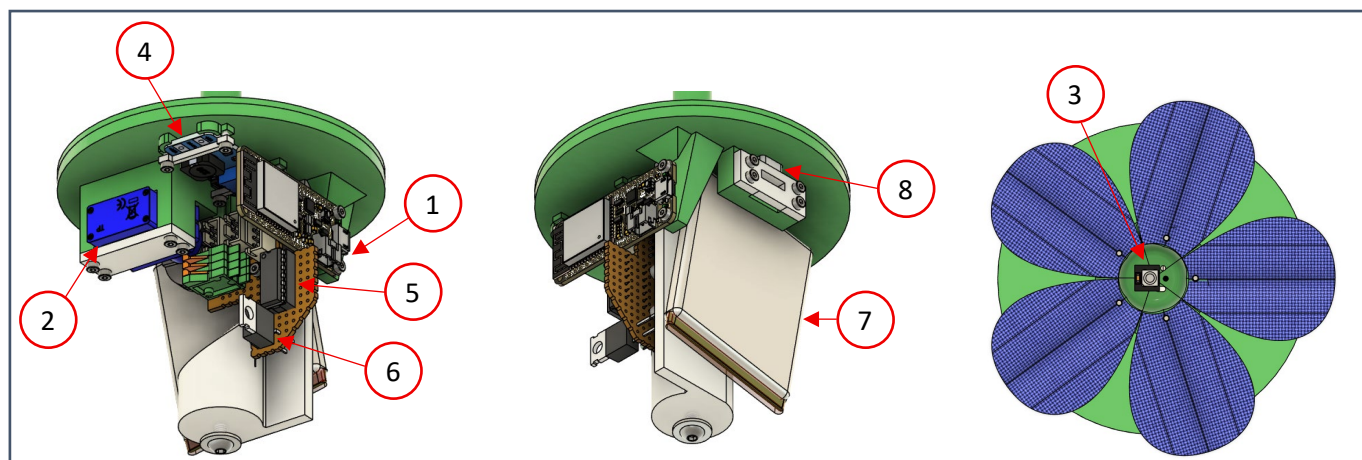


Figure 25 – Position des principaux composants électroniques dans la Fleur numérique.

Le choix de l'ESP32 s'est imposé pour plusieurs raisons : expérience préalable avec ce processeur, intégration native du Wi-Fi, disponibilité d'entrées/sorties PWM, et possibilité d'utiliser le mode *deep sleep* afin de réduire la consommation moyenne par cycles de réveil et de veille. Ce microcontrôleur, déjà disponible au MEI, offrait la possibilité de commander le servomoteur, la LED et le MOSFET depuis une seule plateforme.

Le servomoteur SG90, choisi initialement pour sa compacité et sa disponibilité, s'est révélé légèrement insuffisant en couple pour contrer le poids de la tête, les frottements du câble de mise en tension et le bras de levier induit en position fanée. Il a été remplacé par un MG90S, plus puissant et doté d'engrenages métalliques, tout en conservant le même format, évitant ainsi de modifier la conception mécanique.

L'alimentation est assurée par une batterie LiPo 3,7 V de 3500 mAh, sélectionnée pour offrir une autonomie suffisante et un format adapté à l'intégration dans le pot. Un step-up DC/DC Purecrea MT3608 élève la tension de la batterie à 5 V pour alimenter le servomoteur. Le choix de ce module, disponible au MakeLab de la HEIG-VD, répond à la nécessité de limiter les pertes et de simplifier l'intégration dans un contexte de prototypage rapide.

La LED RGB choisie est une WS2812B prise d'une bande LED. Cette LED réduit le câblage à trois connexions (données, VCC et GND) simplifiant ainsi le passage des câbles dans la tige. Son contrôle logiciel est facilité par des bibliothèques disponibles, mais son entrée de commande requiert un signal 5 V. Cela a conduit à l'ajout d'une porte logique AND 74HCT08, utilisée en configuration de buffer pour convertir les signaux 3,3 V de l'ESP32 en 5 V, à la fois pour la LED et pour la commande du servomoteur.

Un MOSFET IRL540N pilote l'alimentation des périphériques externes (servomoteur, LED, 74HCT08) afin de les couper pendant les phases de *deep sleep* de l'ESP32. Ce composant a été choisi pour sa capacité à supporter le courant combiné des éléments alimentés et à être pleinement commandé avec une tension de grille de 3,3 V.

L'intégration mécanique a été pensée pour éviter tout mouvement libre à l'intérieur du pot. Chaque composant est fixé sur un support imprimé en 3D : MT3608, veroboard, ESP32, MG90S. La batterie est maintenue par un adhésif double face sur son support. Les premières versions du veroboard ne permettaient pas de retirer facilement les éléments ; une deuxième itération a ajouté des connecteurs XHP-3 pour le MT3608 et le servomoteur, un XHP-5 pour l'ESP32 et un bornier pour la LED, facilitant ainsi l'assemblage et la maintenance.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées. Le passage des câbles vers la LED, initialement prévu pour un câble multi-brin de 0,1 mm², a dû être modifié : le diamètre du câble, gaine comprise, empêchait son insertion dans les passages étroits de la tige. Un câble de *wrapping* monobrin plus fin a été utilisé, mais sa rigidité a conduit à des ruptures après flexions répétées. Une nouvelle version de la tige a finalement été conçue pour accueillir le câble prévu initialement. Deux cartes ESP32 ont également été endommagées à cause d'une inversion de polarité sur le connecteur JST-PH de la batterie ; le problème a été résolu en inversant les fils du connecteur.

La documentation technique complète relative à la partie électronique est présentée dans les annexes 10 (Schéma électrique), 11 (Instructions de montage électronique) et 12 (Mécanique et câblage du veroboard).

5.3.2.4 Développement logiciel

Le développement logiciel de la Fleur numérique a suivi une progression itérative, en parallèle des travaux sur la mécanique et l'électronique. Il s'agissait de mettre en place l'ensemble des programmes nécessaires au contrôle du prototype, à sa communication avec un serveur distant, ainsi qu'à la simulation de son usage réel dans un foyer.²

La première étape a été la création du programme embarqué pour l'ESP32. Dans ses premières versions, il servait principalement à tester séparément les composants électroniques (servomoteur, LED RGB, MOSFET) afin de valider la conception matérielle. Au fil des itérations, il a évolué vers une version finale capable de contrôler l'ensemble de la fleur et de communiquer en temps réel avec un serveur via WebSocket. Ce *firmware* recevait les commandes d'état de la fleur (position de fanaison, couleur de la LED) et renvoyait des messages de retour confirmant la bonne réception des instructions ainsi que l'état interne du dispositif.

En parallèle, un serveur de test a été développé en Node.js. Cet outil, conçu pour fonctionner en local, permettait de se connecter à la fleur et de piloter toutes ses fonctionnalités via une interface web communiquant en WebSocket. L'utilisation conjointe de ce serveur et du *firmware* ESP32 a permis de définir progressivement un protocole de communication structuré en JSON, décrivant les messages entrants et sortants, leur format, ainsi que les codes d'état utilisés. Ce serveur de test a joué un rôle central dans les itérations : la fleur ne disposant d'aucun bouton de commande physique, il était beaucoup plus rapide de lancer une commande depuis un ordinateur que de reprogrammer l'ESP32 pour chaque variation de test.

Une fois ces bases en place, un serveur de simulation de l'usage réel de la fleur a été développé. Ce *backend* se connectait à une base de données CarbonViz Home, en récupérait des données réelles de consommation énergétique, puis les rejouait en temps réel pour simuler l'activité d'un foyer. Cette approche permettait de démontrer que le prototype pouvait fonctionner à partir de données externes et reproduire fidèlement le comportement attendu de la fleur dans un contexte domestique.

² Note : les différents programmes ont été développés avec l'aide des outils d'intelligence artificielle ChatGPT 4.1 et 4o (63), Claude Sonnet 4 (64) et GitHub Copilot (65).

Enfin, un programme spécifique a été écrit pour une tâche du test utilisateur du prototype fonctionnel. L'objectif était de simuler l'usage de la fleur sur une période d'une semaine, tout en compressant cette expérience dans un scénario de test d'environ 10 minutes. Les participants disposaient d'une interface web interactive leur permettant de déclencher des actions simulant une consommation numérique. Dans le cadre de ce programme, le fonctionnement de la LED avait été ajusté pour imiter les mouvements de fanaison de la fleur : la couleur suivait une logique parallèle à celle du servomoteur.

Le seul problème rencontré durant cette phase a concerné le *firmware* de l'ESP32. Il était prévu d'ajouter une fonctionnalité permettant de programmer une durée d'animation de la LED, afin qu'elle s'éteigne automatiquement à la fin d'un *timer*. L'ESP32 utilisant déjà un *timer* pour gérer la mise en veille en mode *deep sleep*, des conflits sont apparus entre ce *timer* et celui dédié à la LED. Après plusieurs tentatives de résolution infructueuses et compte tenu du temps restant, cette fonctionnalité a été abandonnée. L'effort a été concentré sur les fonctions essentielles, la minuterie de la LED n'étant essentielle.

Ces différents programmes, bien que développés pour des usages distincts, reposent sur une même logique de communication WebSocket avec des messages JSON normalisés. Cette cohérence a facilité le passage d'un environnement de test à un environnement simulé, puis à une utilisation connectée aux données réelles. Les programmes sont documentés dans les annexes 14 (Programme ESP32 de la Fleur numérique), 15 (Serveur WebSocket de test), 16 (Serveur de simulation temps réel) et 17 (Simulateur d'usage de la Fleur numérique). Chacun de ces programmes dispose d'un fichier d'instructions (README.md) contenant toutes les informations nécessaires à leur installation, leur configuration et leur utilisation.

5.3.2.5 Fonctionnalités de la Fleur numérique

Cette section décrit les fonctionnalités implémentées et testées sur le prototype final de la Fleur numérique. Elles concernent exclusivement les capacités matérielles et logicielles de l'objet tangible, telles qu'elles sont disponibles lors de son utilisation.

La Fleur numérique intègre trois fonctions principales :

- Contrôle de la LED RGB : affichage d'une couleur spécifique selon un mode défini (fixe, clignotant ou pulsé).
- Contrôle du degré de fanaison : ajustement de l'inclinaison de la tige entre 0 et 100 % de « santé ».
- Contrôle de la mise sous tension : activation ou coupure de l'alimentation du système, afin de réduire la consommation électrique pendant une période définie.

Ces fonctions sont pilotées via une connexion WebSocket. Les échanges se font en JSON UTF-8 bidirectionnel entre un serveur et la fleur, ce qui permet d'envoyer des commandes précises et de recevoir des messages d'état en retour.

Commandes entrantes (Serveur → Fleur)

1. Commande LED (`led`)

Permet de définir le comportement lumineux de la LED RGB intégrée au centre de la fleur.

- `mode` (string, requis) : "off", "fixed", "blink", "pulse".
- `color` (array, requis sauf pour "off") : tableau [R, G, B] avec des valeurs de 0 à 255.
- `blink_interval` (entier, optionnel) : intervalle en millisecondes entre deux changements d'état.

Exemple :

```
{
  "led": {
    "mode": "fixed",
    "color": [255, 0, 0],
    "blink_interval": 500
  }
}
```

Code source 1 – Commande JSON de contrôle de la LED.

2. Commande de santé (`health`)

Ajuste le degré de fanaison de la tige en définissant un pourcentage de santé. Ce pourcentage est converti en un angle de rotation du servomoteur.

- `health` (entier, requis) : valeur de 0 à 100, où 100 % correspond à une tige verticale et 0 % à une tige complètement fanée.

Exemple :

```
{
  "health": 75
}
```

Code source 2 – Commande JSON du contrôle du degré de fanaison.

3. Commande de mise en veille (`sleep`)

Place l'ESP32 en mode *deep sleep*, ce qui coupe l'alimentation des périphériques via le MOSFET et réduit drastiquement la consommation électrique.

- `duration` (entier, requis) : durée du sommeil en millisecondes.
- `delay` (entier, optionnel) : délai en millisecondes avant d'entrer en sommeil, utile pour laisser le temps à certaines actions de s'exécuter.

Exemple :

```
{
  "sleep": {
    "duration": 60000,
    "delay": 5000
  }
}
```

Code source 3 – Commande JSON du contrôle de la mise en veille.

Messages sortants (Fleur → Serveur)

- Accusé de réception (`state_received`) : envoyé après traitement d'une commande valide. Peut inclure un bloc `sleep` si un délai avant veille est actif.
- Notification de réveil (`waked_up`) : envoyé immédiatement après la sortie du mode *deep sleep*.
- Erreur de requête (`bad_request`) : envoyé si le message JSON est mal formé ou contient des champs non supportés.

5.3.3 Évaluation

L'évaluation de cette deuxième itération visait à mesurer la pertinence et l'efficacité du prototype fonctionnel de la Fleur numérique, après intégration des choix de conception mécanique, électronique et logicielle. Contrairement à la première itération, centrée sur la comparaison de concepts basse fidélité, ce test se concentrait sur un seul dispositif finalisé, afin d'en examiner la compréhension intuitive, l'impact émotionnel et l'ergonomie dans un scénario d'usage simulé.

L'objectif était d'identifier dans quelle mesure le prototype répondait aux objectifs définis en 5.4.1, de mettre en évidence ses forces et ses limites, et de dégager des pistes d'amélioration. Le test explorait également la réception de concepts alternatifs et les attentes concernant un futur service web associé.

Le rapport complet, incluant le protocole, les outils de collecte et l'analyse des résultats, est disponible en Annexe 18.

5.3.3.1 Méthodologie

Le test utilisateur a été mené en présentiel, selon un protocole modéré et individuel combinant observation directe, méthode du *think-aloud* et entretien semi-dirigé en fin de session. Ce format a été retenu pour permettre aux

participants d'exprimer librement leurs impressions tout en offrant la possibilité d'approfondir certains points en cours d'interaction.

En raison de la date tardive de finalisation du prototype, le recrutement et la conduite des sessions ont dû être concentrés sur une courte période. Afin de maximiser le nombre de retours exploitables dans ce délai, deux sessions ont été réalisées dans un environnement contrôlé à la HEIG-VD et trois au domicile des participants. Ce choix a facilité leur disponibilité, tout en conservant un cadre propice à l'observation.

Chaque session, d'une durée moyenne d'environ 45 minutes, a alterné phases d'interaction avec le prototype et moments d'échange, afin de recueillir à la fois des données comportementales et des retours verbalisés. Les interactions étaient enregistrées en vidéo et audio pour permettre une analyse fine a posteriori.

En complément des observations qualitatives, des mesures quantitatives ont également été recueillies à l'aide d'outils standardisés. Leur intégration avait pour but de croiser des indicateurs objectifs avec les retours exprimés par les participants, afin d'obtenir une vision complète et structurée de l'expérience vécue avec le prototype.

5.3.3.2 Participants

Le recrutement a été limité à cinq participants, conformément aux recommandations de Nielsen (59) qui indiquent qu'un tel échantillon permet d'identifier environ 85 % des problèmes d'utilisabilité, tout en restant gérable dans le temps imparti à l'itération. Ce choix a permis de maintenir un format de session individuel, d'une durée moyenne d'environ 45 minutes, offrant le temps nécessaire pour observer les comportements et recueillir des retours détaillés.

La sélection a volontairement mêlé des profils techniquement avertis (3 participants) et non techniques (2 participants), afin de confronter le prototype à des interprétations et des habitudes d'usage différentes. L'âge moyen du groupe était de $M = 26,6$ ans, avec un usage numérique déclaré allant de 3,8/5 à 4,6/5 sur l'échelle de fréquence. Cette homogénéité sur le confort technologique a permis d'éviter que les éventuelles difficultés d'utilisation soient liées à un manque d'aisance numérique.

Les contextes de vie étaient variés : un participant résidait en maison individuelle, les autres en appartement, avec des configurations allant de la colocation à la vie en famille. Cette diversité a été utile pour explorer différentes projections d'intégration du dispositif dans un foyer.

En termes de sensibilité environnementale, quatre participants se déclaraient « moyennement » sensibles à l'impact environnemental du numérique et un « un peu » seulement. Malgré cette sensibilité modérée, l'intérêt pour l'objet était unanime, avec des motivations exprimées principalement autour de la prise de conscience et de la curiosité. La majorité (4 sur 5) avait déjà utilisé un objet connecté, et tous sauf un se disaient à l'aise avec des signaux physiques tels que la lumière, la forme ou le mouvement.

Cette composition a permis de combiner des retours précis sur l'ergonomie et le fonctionnement avec des réactions plus spontanées sur la perception et l'usage, tout en mettant en lumière des nuances d'interprétation liées aux habitudes numériques et à la sensibilité écologique initiale.

5.3.3.3 Scénario de test

Le scénario a été conçu pour simuler un cycle d'usage complet du prototype dans un temps limité, tout en permettant d'observer la compréhension spontanée, l'appropriation progressive et la projection dans un contexte domestique. L'idée était de reproduire les différentes étapes que pourrait vivre un utilisateur réel, mais dans un format condensé et contrôlé, afin de mettre en lumière à la fois les réactions immédiates et les réflexions émergentes.

La séquence débutait par une phase de découverte libre, le prototype étant présenté en position initiale (tige droite, LED éteinte). Cette approche volontairement neutre permettait d'évaluer les interprétations visuelles et symboliques sans influence externe. Ce moment servait aussi de point de référence pour comparer les impressions initiales avec celles exprimées après l'interaction.

La partie centrale du test reposait sur une simulation accélérée d'une semaine d'utilisation, orchestrée via l'interface web associée. Les participants configuraient d'abord un seuil personnel de consommation, puis exécutaient une série d'actions numériques prédéfinies (ex. *streaming*, réseaux sociaux, navigation web, téléchargement). À chaque action, la LED et la fanaison évoluaient pour représenter respectivement la consommation instantanée et cumulative. Cette mise en situation condensée permettait de provoquer des réactions observables, parfois fortes, tout en évitant la fatigue liée à un test prolongé.

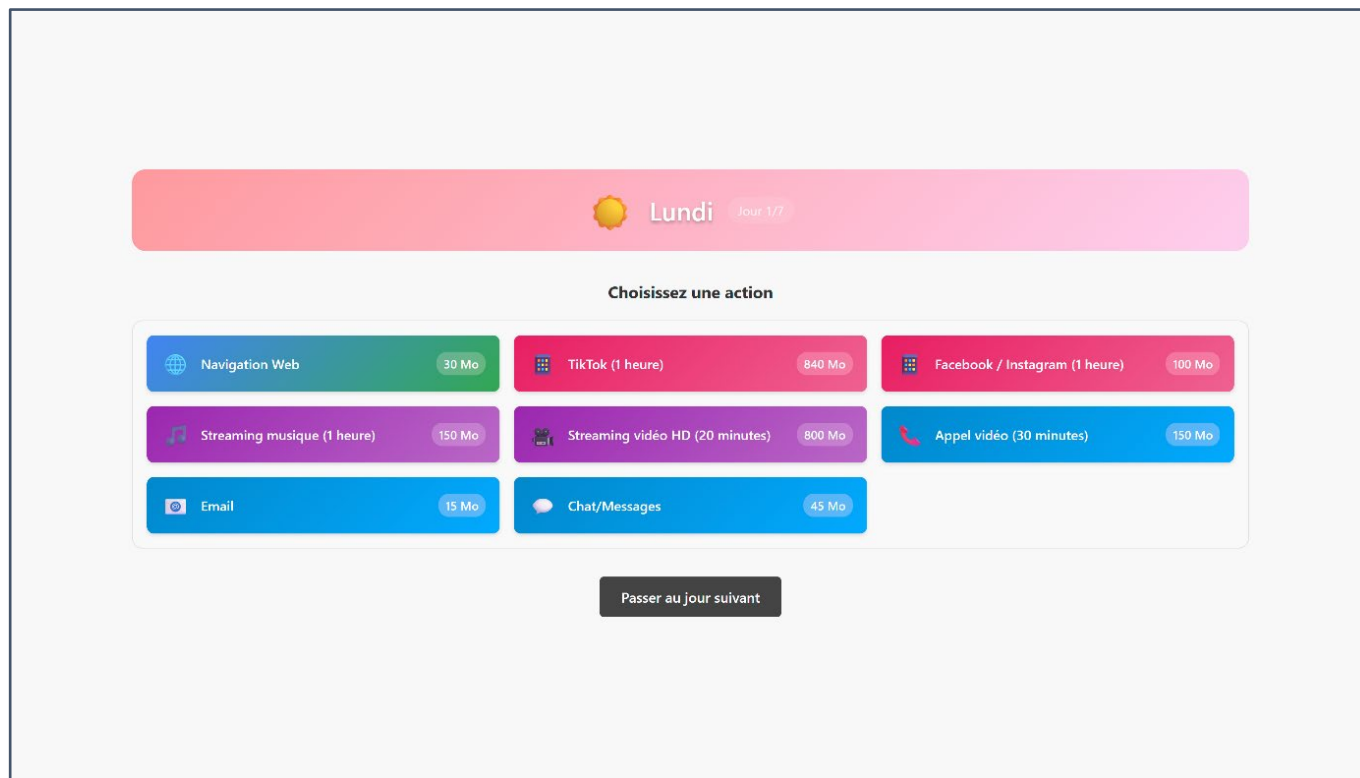


Figure 26 – Test utilisateur du prototype fonctionnel, tâche 2 : Simulation d'une semaine d'utilisation, page du lundi, sélection des activités.

Après cette simulation, un bilan de fin de semaine était demandé, afin de recueillir la compréhension globale et les ressentis. Ce moment favorisait une verbalisation complète de l'expérience, avec souvent un recul critique plus structuré.

Les dernières étapes invitaient les participants à se projeter dans un usage réel, à réagir à des concepts alternatifs et à exprimer leurs attentes pour un service web complémentaire. L'enchaînement visait à élargir la discussion, en allant de l'évaluation du prototype concret vers une réflexion plus large sur la forme que pourrait prendre un produit final, intégré dans un environnement domestique et accompagné d'outils numériques.

L'ordre choisi des étapes n'était pas anodin : commencer par l'observation neutre, créer une expérience marquante via la simulation, puis ouvrir la discussion sur les perspectives, permettait de capter à la fois les impressions brutes, l'effet de l'usage et les idées prospectives.

5.3.3.4 Données collectées

La collecte des données s'est appuyée sur une combinaison d'outils standardisés et d'observations réalisées pendant les sessions.

Trois questionnaires ont été utilisés :

- *Single Ease Question* (SEQ) (66), administré à la fin de chaque tâche, afin de mesurer la facilité perçue sur une échelle de 1 à 7. Les notes obtenues ont permis de calculer une moyenne par tâche.
- *System Usability Scale* (SUS) (67), renseigné à la fin du test, pour obtenir un score global d'utilisabilité sur 100. Chaque participant a attribué une note permettant de calculer un score moyen pour l'échantillon.

- *User Experience Questionnaire* (UEQ) (68–70), complété en fin de session, afin d'évaluer l'expérience utilisateur sur six dimensions (Attraction, Compréhensibilité, Efficacité, Contrôlabilité, Stimulation et Originalité) selon une échelle allant de –3 à +3. Les résultats ont été agrégés sous forme de moyennes par dimension.

En parallèle, des données qualitatives ont été recueillies :

- Observations comportementales pendant les phases d'interaction, incluant gestes, expressions et réactions spontanées.
- Verbatims collectés durant la méthode du *think-aloud* et lors des questions ouvertes.
- Tableaux de synthèse renseignant pour chaque tâche les hypothèses associées, le comportement observé, les points clés et des extraits de citations des participants.

Les résultats issus des questionnaires sont présentés sous forme de tableaux au sein de l'Annexe 18 (Tableaux 5, 6 et 7) et complétés par des enregistrements vidéo et audio pour permettre un archivage complet des interactions. Les retours qualitatifs sont également documentés dans des tableaux dédiés au sein de l'Annexe 18 (Tableaux 8 à 14), regroupant les données par tâche du scénario.

5.3.4 Résultats et enseignements

Cette évaluation a permis de documenter de manière structurée les interactions avec le prototype fonctionnel et de recueillir à la fois des données quantitatives et qualitatives à partir d'observations, de questionnaires et de retours verbalisés. Les modalités précises de collecte sont décrites dans cette section, tandis que les résultats et leur analyse détaillée sont présentés séparément dans le chapitre 6, consacré aux résultats.

Chapitre 6

Résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors du développement et de l'évaluation de la Fleur numérique, en mettant en relation les performances techniques du prototype et les retours issus des tests utilisateurs. L'objectif est d'analyser dans quelle mesure le dispositif répond aux attentes formulées lors de la définition des objectifs du projet et de la deuxième itération.

La première partie expose les capacités fonctionnelles et les limites techniques observées sur le prototype final. La seconde présente les résultats détaillés des tests utilisateurs, en combinant mesures quantitatives et observations qualitatives. Ces données sont ensuite interprétées au regard des objectifs fixés, afin de déterminer les points atteints, partiellement atteints ou non atteints.

6.1 Prototype final

Le prototype final de la Fleur numérique reprend la métaphore physique définie à l'issue de la première itération : une fleur dont l'état évolue en fonction de la consommation numérique. La fanaison de la tige traduit la consommation cumulative sur une période hebdomadaire, tandis que la LED intégrée au centre de la fleur indique l'intensité instantanée.

Sur le plan mécanique, la tige articulée, imprimée en PLA, a offert un mouvement fluide et reproductible, conforme aux attentes. L'élargissement des passages de câbles internes à la tige a permis le passage de câbles multibrins plus flexibles, évitant les ruptures rencontrées lors des premiers essais. La base, intégrée dans un pot du commerce, a accueilli solidement l'ensemble des composants électroniques. Les pétales en feutrine, conçus pour se courber avec la tige, n'ont toutefois pas produit l'effet réaliste escompté, ce qui constitue une limite esthétique.

Sur le plan électronique, le système basé sur un ESP32 a permis de contrôler simultanément le servomoteur MG90S et la LED RGB WS2812B, tout en assurant la mise en veille des périphériques via un MOSFET. La communication en WebSocket avec un serveur Node.js local est restée stable tout au long des tests.

Sur le plan logiciel, le *firmware* embarqué sur l'ESP32 a correctement exécuté les commandes de fanaison, d'éclairage et de mise en veille, avec un retour d'état confirmant leur bonne prise en compte. Ce programme constituait le cœur du fonctionnement du prototype, assurant la coordination entre les différents composants physiques. Autour de ce noyau, plusieurs outils complémentaires ont été développés :

- Un serveur local en Node.js, utilisé pour les tests techniques et le contrôle direct de la fleur.
- Un serveur de simulation connecté aux données de CarbonViz Home, permettant de reproduire le comportement de la fleur à partir de scénarios basés sur des mesures réelles.
- Une interface web de simulation spécialement conçue pour les tests utilisateurs, condensant une semaine d'usage en dix minutes et déclenchant en temps réel les réactions physiques du prototype.

Dans son ensemble, le prototype a permis de valider la faisabilité technique du concept : les fonctions principales ont été exécutées de manière fiable, et le dispositif a pu être utilisé sans interruption durant l'intégralité des sessions de test. Les limites identifiées concernent essentiellement des aspects esthétiques (réalisme des pétales) et la précision de certains signaux lumineux.

6.2 Résultats des tests utilisateurs

L'évaluation du prototype fonctionnel de la Fleur numérique a permis de mesurer la compréhension des signaux physiques, d'évaluer l'ergonomie et l'impact émotionnel du dispositif, et d'identifier les améliorations à envisager. Les données issues des questionnaires standardisés (SEQ, SUS, UEQ), combinées aux observations directes et aux verbatims des participants, offrent une vision claire de la manière dont le prototype a été perçu et utilisé.

Dès la phase de découverte, la tige a été comprise par l'ensemble des participants comme un indicateur cumulatif de consommation, sans explication préalable, ce que confirment les résultats de l'UEQ sur la « Compréhensibilité » ($M = 2,05$) et la note élevée du SEQ ($M = 6,0$) pour cette étape. La LED, bien que visuellement attractive, n'a été assimilée qu'après explication : lors de la simulation accélérée, elle a calqué son comportement sur la tige, empêchant l'évaluation de son animation prévue. Si sa présence attire le regard, son utilité perçue reste variable, ce qui souligne la nécessité d'un test spécifique centré sur ses codes visuels et leur compréhension.

Pendant la simulation d'une semaine d'usage condensée en dix minutes, la réaction de la fleur à une consommation importante a provoqué des réponses émotionnelles marquées. Certains participants ont exprimé de la surprise ou un sentiment de gêne, allant jusqu'à modifier leurs choix pour limiter la dégradation, ce qui valide le potentiel de l'objet comme levier comportemental. Les dimensions « Attraction » ($M = 1,83$) et « Stimulation » ($M = 1,70$) de l'UEQ traduisent cet engagement émotionnel. Toutefois, l'absence de mécanisme permettant à la fleur de « remonter » après une bonne action fait peser un risque de démotivation si l'objet reste fané sur une longue durée.

L'acceptabilité du dispositif a été confirmée : tous les participants se projettent avec la fleur dans leur foyer, principalement dans des lieux de passage, ce qui maximise sa visibilité et son effet de rappel. La projection dans un usage réel a obtenu une note SEQ de $M = 5,8$, et l'UEQ confirme une forte « Originalité » ($M = 2,25$). Des améliorations esthétiques ont néanmoins été proposées, telles que des pétales fanant avec la tige, l'ajout de feuilles ou des matériaux plus naturels, afin de renforcer l'intégration visuelle dans un environnement domestique.

Lors des discussions sur des alternatives, plusieurs idées ont été avancées : mécanisme de récupération de la fleur, alimentation optimisée pour maximiser l'autonomie, ou encore rendu plus réaliste. Cette partie a obtenu une note SEQ de $M = 4,8$, traduisant la difficulté à se projeter sans support visuel. Les participants ont également exprimé un intérêt unanime pour un service web complémentaire, qui obtiendrait un SEQ de $M = 5,6$, avec des attentes précises : suivi analytique sous forme de graphiques, conseils personnalisés, alertes en cas de dépassement de seuil, et fonctionnalités sociales telles que la comparaison ou le classement. Plusieurs ont suggéré que ce service intègre le mécanisme de récupération, afin de prolonger la motivation et d'éviter l'effet de sanction permanente.

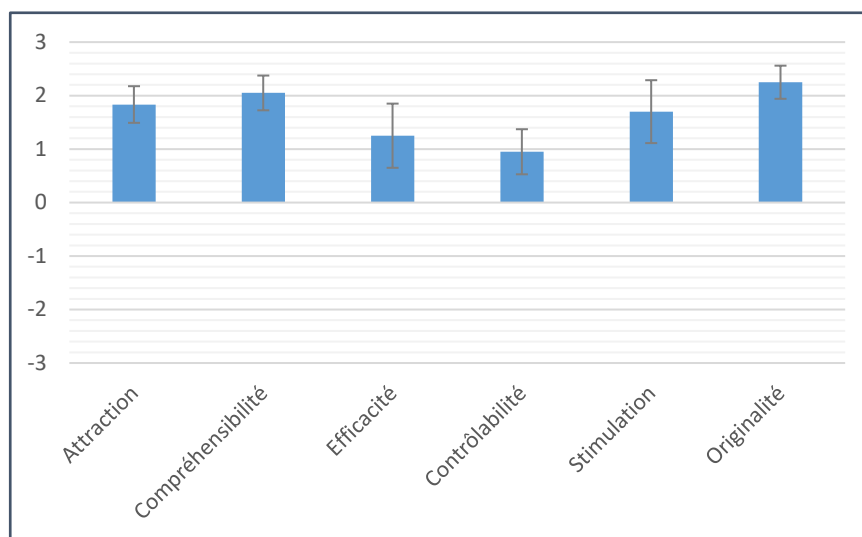


Tableau 5 – Résultats UEQ du prototype final : graphique en barres des moyennes par dimension

La corrélation entre les données quantitatives et qualitatives confirme ces tendances : le score moyen du SUS ($M = 86,25$) reflète une excellente perception de l'usabilité. L'UEQ met en avant l'Originalité et la Compréhensibilité, mais montre une Contrôlabilité plus faible ($M = 0,95$) et une Efficacité modérée ($M = 1,25$), en cohérence avec les retours sur le sentiment d'impuissance vis-à-vis du sort de la fleur et la difficulté à interpréter certains signaux lumineux. Le SEQ met également en évidence un contraste entre les étapes initiales, bien notées, et les phases plus complexes, comme la simulation journalière ou la discussion sur les alternatives.

Problèmes identifiés et recommandations

1. LED peu intuitive et mal représentée dans le test

- Mener des tests spécifiques pour évaluer ses animations.
- Clarifier le code couleur, en particulier l'orange.
- Améliorer l'accessibilité pour les personnes daltoniennes.
- Évaluer l'utilité réelle en usage quotidien.

2. Impact émotionnel négatif sans possibilité de récupération

- Introduire un mécanisme d'amélioration de la santé de la fleur, déclenché par des « bonnes actions » numériques, afin de maintenir la motivation.

3. Fanaison trop abrupte et décalage avec la consommation réelle

- Calibrer une courbe plus progressive (logarithmique).
- Définir des seuils intermédiaires de début de fanaison pour éviter une dégradation trop précoce.

4. Incohérence perçue dans l'alimentation

- Optimiser l'autonomie de la batterie.
- Évaluer deux configurations : avec LED et sans LED, pour trouver un compromis entre visibilité et autonomie.

En conclusion, le test utilisateur valide les hypothèses principales : la fanaison est comprise spontanément, l'impact émotionnel est réel, et l'acceptabilité du dispositif est forte. Les retours recueillis permettent d'identifier plusieurs axes d'amélioration clairs, notamment la lisibilité de la LED, le calibrage de la fanaison et l'intégration de mécanismes de feedbacks positifs.

Ces constats servent de base à l'évaluation de l'atteinte des objectifs du projet.

6.3 Atteinte des objectifs

L'évaluation du prototype final permet de dresser un bilan précis de l'atteinte des objectifs fixés à l'issue de la première itération et de ceux définis pour le projet dans son ensemble.

Sur le plan des objectifs spécifiques à la deuxième itération, la plage et la segmentation de la fanaison ont été optimisées, offrant un mouvement fluide et progressif entre la position verticale et la fanaison complète. La LED RGB a été configurée pour indiquer l'intensité de la consommation par un code couleur normalisé vert-orange-rouge, mais son rôle n'a pas été pleinement compris sans explication préalable, ce qui en limite l'efficacité immédiate. Le retour à la position initiale sur la base d'un cycle hebdomadaire a été correctement implémenté et testé, assurant une remise à zéro régulière. En revanche, l'objectif visant à éviter les états fanés prolongés n'a pas été atteint : la dégradation a été jugée trop rapide et parfois disproportionnée par rapport à la consommation réelle, ce qui peut décourager l'utilisateur. La tentative d'enrichir la métaphore avec des pétales se courbant naturellement s'est révélée infructueuse, l'effet visuel escompté n'ayant pas été obtenu. Enfin, la réalisation d'un prototype haute fidélité complet a été menée avec succès, intégrant mécanique, électronique et logiciel, et permettant une simulation fonctionnelle à partir de données réelles de CarbonViz Home.

Du point de vue des objectifs globaux du projet, le dispositif a démontré sa capacité à rendre perceptible l'impact énergétique des usages numériques domestiques à travers une métaphore simple et compréhensible. La fanaison de la tige a été largement interprétée comme un indicateur de consommation cumulative et a généré un impact émotionnel mesurable, influençant parfois les comportements simulés. L'acceptabilité a été confirmée, avec une intégration jugée réaliste dans un environnement domestique et des propositions d'amélioration esthétique pour renforcer cet aspect. Les participants ont également exprimé un intérêt marqué pour des fonctionnalités complémentaires, notamment via un service web offrant un suivi analytique, des conseils personnalisés et des mécanismes de motivation sociale.

En résumé, la majorité des objectifs fixés ont été atteints, qu'il s'agisse de la validation technique, de la compréhension de la métaphore ou de l'acceptabilité du dispositif. Néanmoins, plusieurs points restent à améliorer, notamment la lisibilité et l'utilité de la LED, le calibrage de la vitesse de fanaison, l'intégration d'un mécanisme de récupération et l'optimisation énergétique du système. Ces constats seront discutés plus en détail dans le chapitre suivant, qui propose une analyse critique du projet, de ses résultats et de ses perspectives.

Chapitre 7

Discussion

Après avoir présenté les résultats issus des tests utilisateurs, ce chapitre propose une lecture critique de ces données à la lumière des objectifs initiaux du projet. Il revient d'abord sur les conditions de réalisation, en analysant les choix méthodologiques, les contraintes rencontrées et leur influence sur le déroulement du projet. Il examine ensuite la portée effective des résultats obtenus, en mettant en évidence les points forts du dispositif comme ses limites. La contribution des tests utilisateurs est également discutée, notamment leur rôle stratégique dans l'identification des ajustements prioritaires. Enfin, une réflexion est engagée sur l'impact écologique du prototype, avant d'ouvrir sur des perspectives d'amélioration, d'intégration et de déploiement du concept.

7.1 Critique du processus

L'achèvement d'un prototype fonctionnel au terme du projet constitue une réussite majeure, tant sur le plan technique que sur la qualité perçue. Produire un dispositif capable de traduire physiquement la consommation numérique en temps réel représentait un objectif ambitieux, et le résultat final répond globalement aux attentes. Toutefois, l'analyse du déroulement du projet met en évidence plusieurs limites.

La contrainte temporelle a été déterminante. Estimé initialement à environ nonante jours, le projet a dû être compressé sur onze semaines, ce qui a conduit à supprimer certaines marges de sécurité pour conserver un maximum d'éléments au programme. Cette contraction a entraîné un débordement de tâches critiques : la conception et la réalisation du prototype fonctionnel ont mobilisé quatre semaines au lieu des deux prévues. Cette situation a nécessité l'abandon de la création d'une maquette pour l'interface web associée et d'une phase d'adaptation du prototype final en fonction des retours du dernier test utilisateur. Ces recommandations, portant notamment sur la lisibilité de la LED et le calibrage de la fanaison, n'ont donc pas pu être intégrées et restent à appliquer lors d'une reprise ultérieure. Avec le recul, une réduction des exigences initiales aurait permis une gestion plus équilibrée du temps, tout en évitant une pression constante sur le calendrier, même si cette compression a sans doute été un facteur clé pour livrer un prototype pleinement fonctionnel dans les délais.

Le processus d'idéation initial a été plus complexe que prévu. Un *workshop* a bien été organisé, mais uniquement avec des étudiants. Il aurait été plus pertinent de le mener avec des experts du domaine, ce qui aurait probablement favorisé l'émergence d'idées plus en phase avec les besoins du projet. La phase initiale a également exploré un concept alternatif, le « personnage numérique », qui, bien que créatif, s'alignait moins avec les objectifs fixés et s'appuyait sur un nombre plus limité de recommandations issues de la recherche documentaire. Ce concept a néanmoins enrichi la réflexion et confirmé la pertinence de la Fleur numérique, dont la métaphore simple et lisible a été unanimement saluée lors des tests.

Le cadre de travail a représenté un atout important. Le bureau mis à disposition au MEI a permis de travailler dans de bonnes conditions et de bénéficier de conseils réguliers du mandant et de l'enseignant référent, impliqués mais non directifs. Les ressources matérielles du MEI, telles que les imprimantes 3D et les filaments adaptés, ont été déterminantes pour le prototypage. L'accès au MakeLab de la HEIG-VD a offert un bilan plus nuancé : malgré la présence d'outils de qualité, comme des fers à souder et des tarauds utiles pour la mécanique, le manque d'organisation et l'absence de certains équipements spécifiques ont parfois freiné l'avancée du projet.

En somme, le processus a permis d'atteindre un objectif ambitieux dans un cadre contraint, aboutissant à un prototype fonctionnel apprécié pour sa qualité technique et sa clarté conceptuelle. Si les conditions de travail et les ressources disponibles ont constitué des atouts majeurs, la gestion du temps, la préparation de l'idéation et l'accès à certains équipements ont représenté des freins notables.

7.2 Critique des résultats

L'évaluation du prototype final montre que la Fleur numérique atteint ses objectifs principaux : elle est comprise, jugée innovante et capable de susciter une réaction émotionnelle pouvant influencer les comportements numériques. Les mesures quantitatives et les retours qualitatifs convergent vers une perception globalement positive, tout en soulignant plusieurs points perfectibles.

Les scores au SUS ($M = 86,25$) confirment une excellente usabilité perçue, cohérente avec la note SEQ moyenne de $M = 6,0$ lors de la première interaction, où la fanaison a été comprise sans explication préalable. Les dimensions Originalité ($M = 2,25$) et Compréhensibilité ($M = 2,05$) de l'UEQ indiquent que le concept est jugé clair et engageant. Toutefois, le score plus faible en Contrôlabilité ($M = 0,95$) reflète un sentiment de maîtrise limité, en accord avec les verbatims évoquant l'impossibilité d'agir pour « faire remonter » la fleur.

La calibration de la fanaison est apparue comme un point sensible. Plusieurs participants ont trouvé la dégradation trop rapide, avec un impact visuel important dès les premières consommations simulées. Si cet effet peut renforcer la prise de conscience, il comporte aussi un risque de démotivation si la fleur reste longtemps dans un état dégradé.

La LED RGB, bien que visuellement attractive, n'a pas pu être évaluée dans ses conditions d'usage réelles : son comportement a été synchronisé avec celui de la fanaison pour les besoins du protocole accéléré, réduisant la possibilité d'en apprécier la valeur ajoutée comme indicateur instantané. Si le rouge a été jugé intuitif, d'autres couleurs, notamment l'orange, ont été moins bien perçues, et certains participants n'ont pas observé toutes les nuances. Le cas d'un participant daltonien souligne également la nécessité d'ajouter des paramètres visuels complémentaires, tels que la fréquence ou l'intensité lumineuse.

L'acceptabilité domestique du dispositif est forte. Les participants se projettent facilement dans un usage réel, avec une préférence pour un emplacement visible (salon, couloir) et une nette préférence pour un objet tangible par rapport à un suivi numérique sur écran. Plusieurs ont indiqué que la réaction de la fleur pourrait influencer leurs décisions d'usage, ce qui valide le potentiel de l'objet comme levier comportemental.

Enfin, les discussions sur des évolutions possibles ont révélé un intérêt pour : un fanaison plus réaliste impliquant aussi les pétales, l'intégration de mécanismes de récupération après des actions positives, et un suivi analytique via un service web complémentaire. Ces propositions montrent que si la Fleur numérique fonctionne déjà comme outil de sensibilisation, son engagement pourrait être renforcé en équilibrant les signaux d'alerte avec des feedbacks positifs.

En résumé, les résultats confirment la pertinence du concept et sa capacité à atteindre ses objectifs de sensibilisation, tout en identifiant trois priorités d'amélioration : affiner la calibration de la fanaison, améliorer la lisibilité et l'accessibilité des signaux lumineux, et intégrer des mécanismes positifs de motivation pour maintenir l'engagement à long terme.

7.3 Importance des tests utilisateurs

Les tests utilisateurs ont constitué un levier central pour évaluer la pertinence et l'efficacité du prototype, en fournissant à la fois des données quantitatives objectives et des observations qualitatives riches. Leur rôle a été double : confirmer les éléments du concept qui fonctionnent et identifier les points faibles nécessitant des ajustements.

L'approche choisie, combinant mesures standardisées (SEQ, SUS, UEQ) et observations directes, a permis d'obtenir une vision complète de l'expérience vécue par les participants.

Au-delà des résultats immédiats, ces tests ont également joué un rôle stratégique : ils ont permis de hiérarchiser les améliorations à apporter et de distinguer ce qui relève de simples optimisations (ex. réglage de l'angle de fanaison) de ce qui pourrait modifier en profondeur l'expérience utilisateur (ex. ajout de mécanismes de récupération). Cette priorisation n'aurait pas été possible sans l'observation directe des comportements et l'écoute des réactions spontanées, qui révèlent souvent des problématiques difficilement détectables par les seules mesures quantitatives.

Enfin, le test final, en reproduisant un scénario condensé d'usage réel, a permis d'anticiper la manière dont le dispositif pourrait être perçu au quotidien, avec ses forces mais aussi ses limites en matière de motivation sur le long terme. Les enseignements tirés de cette phase constituent ainsi un socle solide pour toute itération future, en assurant que les évolutions envisagées reposent sur des données tangibles et non sur de simples suppositions.

7.4 Aspects écologiques du dispositif

La Fleur numérique a été conçue dans le but de sensibiliser à l'impact énergétique du numérique. Cette vocation impose, par cohérence, d'examiner son propre impact environnemental, en tenant compte de ses matériaux, de sa fabrication et de son usage. Un dispositif de sensibilisation perdrait en crédibilité si sa production et son fonctionnement engendraient un coût écologique supérieur aux économies qu'il encourage.

L'empreinte environnementale actuelle du prototype repose sur deux aspects principaux :

- **Matériaux mécaniques** : la structure est imprimée en PLA, un bioplastique partiellement biosourcé et compostable industriellement. Le choix du PLA, largement utilisé dans le prototypage rapide, s'explique par sa facilité d'impression, sa disponibilité et sa stabilité dimensionnelle. Toutefois, même biosourcé, le PLA implique un processus industriel consommateur d'énergie et ne résout pas la question de la fin de vie du produit lorsque celui-ci intègre des composants électroniques.
- **Composants électroniques** : le microcontrôleur, le servomoteur, la LED et l'électronique associée représentent une part importante de l'énergie grise du dispositif. Leur fabrication requiert l'extraction et la transformation de métaux rares et d'autres ressources à fort impact environnemental. Aucun de ces composants n'est actuellement conçu pour un démontage ou un recyclage aisé.

À ce stade, aucune analyse complète du cycle de vie (ACV) n'a été menée, et la consommation électrique en usage n'a pas été mesurée directement. Cependant, une estimation préliminaire a été réalisée sur la base des consommations moyennes des composants :

Composants	Consommation moyenne estimée [mA]
MG90S	200
WS2812B	40
ESP32 (with Wifi)	240

Cycles	Durée [s]
Réveil	5
Veille	55

Specific data center electricity use [kWh/bytes]	6,16E-11
Specific core network electricity use [kWh/bytes]	8,39E-11

U [V]	I [A]	P [W]	E [Wh]	Équivalence électrique [MiB]	MiB à économiser sur une semaine
5	0,48	2,4	0,2	1,311	220,230

Tableau 6 – Estimation de la consommation électrique hebdomadaire du prototype et équivalence en données économisées pour compenser son impact.

Sur cette base, la puissance moyenne est de 2,4 W, soit environ 0,2 Wh par cycle (5 s actif / 55 s veille), équivalant à 1,311 MiB en électricité nécessaire au transfert de données. Pour que l'impact énergétique du dispositif soit compensé, un utilisateur devrait économiser environ 220 MiB de données par semaine.

Il est à noter que si le temps de veille était doublé (par exemple 110 s au lieu de 55 s pour la même durée de réveil), l'impact énergétique hebdomadaire du dispositif serait approximativement divisé par deux, réduisant d'autant le volume de données à économiser pour atteindre un bilan neutre.

Les recherches récentes en conception durable de TUIs ouvrent plusieurs pistes d'amélioration. Perner-Wilson et al. (71) soulignent l'intérêt d'explorer des biomatériaux fabriqués à partir de ressources renouvelables ou de déchets organiques, comme des bioplastiques à base d'algues, des mousses biosourcées (*biofoams*) ou des composites à base de fibres naturelles (72). Ces matériaux peuvent être produits localement, réduire la dépendance aux plastiques industriels et limiter l'impact carbone de la fabrication. Leur usage dans des pièces non structurelles ou décoratives (par exemple les pétales) pourrait réduire la part de PLA tout en améliorant la cohérence écologique du dispositif.

L'article met également en avant l'importance de concevoir pour le démontage et le recyclage (*design for unmaking*) (72). Dans le cas de la Fleur numérique, une approche modulaire permettrait de séparer facilement l'électronique, réutilisable dans d'autres prototypes, des parties mécaniques, plus facilement compostables ou recyclables. Cette modularité faciliterait également la maintenance et prolongerait la durée de vie du produit.

Ces évolutions présentent toutefois des contraintes : la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle des biomatériaux restent inférieures à celles du PLA, et leur compatibilité avec les pièces en mouvement ou l'électronique doit être soigneusement testée. De plus, certaines solutions biosourcées nécessitent des conditions spécifiques de stockage et d'usage pour éviter une dégradation prématurée.

Pour une future itération, plusieurs pistes concrètes se dégagent :

- Réaliser une ACV complète pour mesurer l'impact global du dispositif et identifier les priorités de réduction.
- Expérimenter des biomatériaux pour les parties non sollicitées mécaniquement, comme les pétales.
- Mesurer précisément la consommation électrique en usage pour établir un seuil clair de rentabilité écologique (données économisées vs. impact de fabrication et d'usage).

En intégrant ces dimensions, la Fleur numérique pourrait renforcer la cohérence entre son message de sensibilisation et sa matérialité, tout en s'inscrivant dans une démarche de conception durable alignée avec les recommandations de la recherche en TUIs durables (72).

7.5 Perspectives

Les résultats obtenus avec la Fleur numérique ouvrent plusieurs axes de développement et d'exploitation, tant pour améliorer le prototype que pour envisager son intégration dans des contextes réels ou élargis.

7.5.1 Pistes d'amélioration et prolongements

Les tests utilisateurs ont mis en évidence plusieurs leviers d'optimisation. Le calibrage de la fanaison pourrait être ajusté, par exemple en adoptant une courbe logarithmique afin d'éviter une dégradation trop rapide et maintenir la motivation de l'utilisateur sur la durée. L'ajout de mécanismes de récupération, permettant à la fleur de "remonter" après des actions vertueuses, renforcerait l'équilibre entre signaux d'alerte et *feedbacks* positifs. La LED nécessiterait une meilleure lisibilité, notamment en différenciant plus nettement les couleurs et en offrant une alternative visuelle pour les personnes daltoniennes. Sur le plan mécanique, la réduction de la résistance due au passage des câbles dans la tige permettrait d'atteindre plus facilement l'angle de fanaison maximal. Enfin, l'intégration d'une logique d'éco-conception plus poussée, incluant un choix de matériaux alternatifs et une modularité accrue, renforcerait la cohérence environnementale du dispositif.

7.5.2 Potentiel d'intégration ou d'exploitation

En usage domestique, la Fleur numérique pourrait être connectée à des systèmes de suivi énergétique plus larges, comme des compteurs intelligents ou des plateformes de suivi environnemental, afin de croiser les données numériques avec d'autres indicateurs de consommation. Dans un contexte éducatif, elle pourrait être utilisée comme outil pédagogique interactif pour illustrer la matérialité du numérique et ses impacts invisibles, en s'appuyant sur des scénarios adaptés à différents publics. Des partenariats avec des institutions publiques ou des ONG environnementales pourraient également être envisagés pour intégrer la fleur dans des campagnes de sensibilisation, où elle servirait de support tangible à des messages de réduction d'impact.

7.5.3 Ouvertures à d'autres usages ou contextes

La métaphore de la fanaison pourrait être déclinée pour représenter d'autres types d'indicateurs environnementaux ou sociaux, par exemple la qualité de l'air, la consommation d'eau ou même l'empreinte carbone d'un événement. En changeant la source de données et les paramètres de calibration, le même principe d'interface tangible pourrait ainsi être appliqué à des contextes industriels, urbains ou communautaires. De plus, des déclinaisons esthétiques ou matérielles pourraient être développées pour s'adapter à différents environnements, allant d'un objet décoratif discret à une installation artistique interactive.

7.5.4 Synthèse

En synthèse, les perspectives de développement de la Fleur numérique combinent des optimisations techniques, une exploitation dans des contextes variés et une ouverture à de nouveaux usages. La prochaine étape consisterait à mener des tests prolongés en conditions réelles, en intégrant progressivement les améliorations. Cela afin d'évaluer l'engagement à long terme des utilisateurs et la capacité du dispositif à générer un changement durable dans les comportements numériques.

7.6 Conclusion

Ce Travail de Bachelor, réalisé pour le Media Engineering Institute (MEI) de la HEIG-VD, visait à concevoir et développer un dispositif tangible capable de rendre perceptible l'impact énergétique des usages numériques domestiques. L'objectif était de matérialiser ces données à travers une métaphore visuelle et physique simple, compréhensible par un large public, afin de favoriser la prise de conscience et, potentiellement, l'adoption de comportements plus sobres.

Pour répondre à cette problématique, le projet a suivi un processus itératif structuré en plusieurs étapes : une phase de recherche documentaire et de définition conceptuelle, un *workshop* d'idéation, le développement et la comparaison de deux prototypes basse fidélité, la sélection de la Fleur qui fane comme concept final, puis la réalisation d'un prototype fonctionnel haute fidélité intégrant mécanique, électronique et logiciel. L'ensemble a été évalué lors d'un test utilisateur en conditions proches de l'usage réel.

La contrainte temporelle a constitué un facteur déterminant : initialement estimé sur environ nonante jours, le projet a dû être compressé sur onze semaines, réduisant les marges de manœuvre et entraînant l'abandon de certaines étapes prévues, comme la conception d'une interface web complémentaire ou l'adaptation du prototype final après les tests. Malgré cela, un prototype complet et fonctionnel a pu être livré, ce qui constitue une réussite majeure compte tenu des ambitions initiales.

Les résultats des tests utilisateurs valident la pertinence du concept : la fanaison de la tige a été comprise sans explication préalable, la métaphore a suscité un impact émotionnel significatif, et l'acceptabilité domestique a été jugée élevée. Les mesures quantitatives (SUS : M = 86,25 ; UEQ Originalité : M = 2,25) confirment une perception positive, tandis que les retours qualitatifs identifient des améliorations possibles, telles que le calibrage progressif de la fanaison pour éviter une dégradation trop rapide, l'amélioration de la lisibilité des couleurs affichées par la LED, notamment pour les personnes daltoniennes, et l'ajout de mécanismes de feedbacks positifs déclenchés par des comportements numériques vertueux.

Le projet soulève également la question de la cohérence environnementale. Bien que fabriqué majoritairement en PLA bioplastique, le dispositif intègre des composants électroniques à forte énergie grise. Dans sa programmation actuelle, une estimation préliminaire montre qu'un utilisateur devrait économiser environ 220 MiB de données par semaine pour compenser son impact énergétique. Cette valeur pourrait toutefois être abaissée par des optimisations logicielles, par exemple en augmentant le temps de veille ou en réduisant la fréquence des cycles actifs, ce qui souligne la nécessité d'une approche d'éco-conception plus poussée lors d'éventuelles itérations futures.

Sur le plan professionnel, ce projet a mobilisé un large éventail de compétences : idéation, prototypage mécanique, intégration électronique, développement logiciel, méthodologie UX et gestion de projet sous contrainte. Il a permis d'acquérir une expérience concrète en conception de TUIs et en évaluation utilisateur, tout en illustrant l'importance d'articuler rigueur technique, qualité de l'expérience et pertinence environnementale.

En conclusion, la Fleur numérique remplit sa mission première : rendre tangible un phénomène abstrait et engager l'utilisateur dans une réflexion sur sa consommation numérique. Les améliorations identifiées, tant sur le plan technique qu'écologique, constituent une base solide pour une itération ultérieure, que ce soit dans un cadre académique, professionnel ou dans le cadre d'un déploiement plus large comme outil de sensibilisation.

Bibliographie

1. HEIG-VD. Media Engineering Institute - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/instituts/mei/>
2. HEIG-VD. HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 2 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/>
3. HEIG-VD. CarbonViz: Prendre la mesure de nos activités numériques. - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/projets/carbonviz-prendre-la-mesure-de-nos-activites-numeriques>
4. INSTITUT D'INGÉNIERIE DES MÉDIAS (MEI) DE LA HEIG-VD. Carbonviz Home. [en ligne]. 2024. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://carbonviz.heig-vd.ch/carbovirium/fr>
5. HEIG-VD. Institut Reconfigurable and Embedded Digital Systems - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 2 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/instituts/reds/>
6. LECORNEY, Stéphane et BOLLI, Laurent. Measuring Online Activities in Households: A Data Collection Methodology. .
7. YVES FROIDEVAUX, OFS. Utilisation d'Internet par les ménages et les individus en 2023 - GNP Diffusion. *Utilisation d'Internet par les ménages et les individus en 2023 - GNP Diffusion*. [en ligne]. 2023. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.bfs.admin.ch/news/fr/2024-0264>
8. PERASSO, Etienne Lees. EVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMERIQUE EN FRANCE ET ANALYSE PROSPECTIVE. *ADEME, Arcep*. 15 avril 2025. pp. 18.
9. HILTY, Lorenz et BIESER, Jan. Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland. . 2017. pp. 62.
10. RIST, Thomas et MASOODIAN, Masood. Promoting Sustainable Energy Consumption Behavior through Interactive Data Visualizations. *Multimodal Technologies and Interaction*. 21 juillet 2019. Vol. 3, n° 3, pp. 56. DOI 10.3390/mti3030056.
11. SHAER, Orit et HORNECKER, Eva. Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*. 2009. Vol. 3, n° 1-2, pp. 1-137. DOI 10.1561/11000000026.

12. THALER, Richard H. et SUNSTEIN, Cass R. *Nudge: improving decisions about health, wealth, and happiness*. . New Haven (Conn.) : Yale university press, 2008. ISBN 978-0-300-12223-7.
13. FOGG, Brian Jeffrey. Fogg Behavior Model - BJ Fogg. *Fogg Behavior Model*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 7 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.behaviormodel.org>
14. SCHULTZ, P. Wesley, NOLAN, Jessica M., CIALDINI, Robert B., GOLDSTEIN, Noah J. et GRISKEVICIUS, Vldas. The Constructive, Destructive, and Reconstructive Power of Social Norms. *Psychological Science*. mai 2007. Vol. 18, n° 5, pp. 429-434. DOI 10.1111/j.1467-9280.2007.01917.x.
15. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
16. THIERRY M. CORNU. Guidelines for Writing a Scientific Report. . 31 juillet 2014. pp. 13.
17. FAULK, Saskia et BRÜCHER, Marcelle. *La rédaction en ingénierie des médias*. 22 avril 2023.
18. DAY, Robert A. et GASTEL, Barbara. *How to write and publish a scientific paper*. . 7. ed., 4. print. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2014. ISBN 978-1-107-67074-7.
19. CHALAL, M.L., MEDJDOUB, B., BEZAI, N., BULL, R. et ZUNE, M. Visualisation in energy eco-feedback systems: A systematic review of good practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2022. Vol. 162, pp. 112447. DOI 10.1016/j.rser.2022.112447.
20. FROELICH, Jon, FINDLATER, Leah et LANDAY, James. The design of eco-feedback technology. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Atlanta Georgia USA : ACM, 10 avril 2010. pp. 1999-2008. [Consulté le 4 juin 2025]. ISBN 978-1-60558-929-9. DOI 10.1145/1753326.1753629.
21. VAN DAM, S. S., BAKKER, C. A. et VAN HAL, J. D. M. Home energy monitors: impact over the medium-term. *Building Research & Information*. octobre 2010. Vol. 38, n° 5, pp. 458-469. DOI 10.1080/09613218.2010.494832.
22. DARBY, Sarah. THE EFFECTIVENESS OF FEEDBACK ON ENERGY CONSUMPTION. . avril 2006. pp. 24.
23. HERRMANN, Melanie R., BRUMBY, Duncan P., ORESZCZYN, Tadj et GILBERT, Xavier M. P. Does data visualization affect users' understanding of electricity consumption? *Building Research & Information*. 3 avril 2018. Vol. 46, n° 3, pp. 238-250. DOI 10.1080/09613218.2017.1356164.
24. DIMITRIOU, Nikos, GARBI, Anastasia, VASILAKIS, Kostas, SCHOOF, Anthony, TAHA, Amr, NIKIFORAKIS, Manolis, KOTSILITIS, Sarantis, PAPAIOANNOU, Thanasis G., KOTSOPOULOS, Dimosthenis, BARDAKI, Cleopatra, PURSCHE, Fabian et DELIYSKI, Nikolay. ChArGED: Implementing a framework for improving energy efficiency in public buildings through IoT-enabled energy disaggregation and serious games. In : *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. [en ligne]. Athens : IEEE, mars 2018. pp. 65-70. [Consulté le 21 mai 2025]. ISBN 978-1-5386-3227-7. DOI 10.1109/PERCOMW.2018.8480290.
25. ISHII, Hiroshi et ULLMER, Brygg. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In : *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*. [en ligne]. Atlanta Georgia USA : ACM, 27 mars 1997. pp. 234-241. [Consulté le 19 mai 2025]. ISBN 978-0-89791-802-2. DOI 10.1145/258549.258715.
26. GUSTAFSSON, Anton et GYLLENSWÄRD, Magnus. The power-aware cord: energy awareness through ambient information display. In : *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. New

York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2 avril 2005. pp. 1423-1426. [Consulté le 25 juin 2025]. CHI EA '05. ISBN 978-1-59593-002-6. DOI 10.1145/1056808.1056932.

27. JANSEN, Yvonne, DRAGICEVIC, Pierre, ISENBERG, Petra, ALEXANDER, Jason, KARNIK, Abhijit, KILDAL, Johan, SUBRAMANIAN, Sriram et HORNBAEK, Kasper. Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Seoul Republic of Korea : ACM, 18 avril 2015. pp. 3227-3236. [Consulté le 20 mai 2025]. ISBN 978-1-4503-3145-6. DOI 10.1145/2702123.2702180.

28. DRAGICEVIC, Pierre. Wable: Web Behavior Shown with a Dynamic Bar Chart. *List of Physical Visualizations*. [en ligne]. 29 février 2012. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://dataphys.org/list/wable-visualize-web-behavior-as-a-physical-bar-chart/>

29. HODGKIN, Dorothy Mary Crowfoot. 1945 – *Electron Density Map and Molecular Model of Penicillin*. [en ligne]. 1945. [Consulté le 3 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://dataphys.org/list/electron-density-map-and-molecular-model-of-penicillin/>

30. ILYA.OSIPOV. *English: SandScape device installed in the Children's Creativity Museum in San Francisco*. [en ligne]. 2 février 2017. [Consulté le 3 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SandScape.jpg> Own work

31. PIPER, Ben, RATTI, Carlo et ISHII, Hiroshi. Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis. . 2002. pp. 8.

32. ULLMER, B. et ISHII, H. Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*. 2000. Vol. 39, n° 3.4, pp. 915-931. DOI 10.1147/sj.393.0915.

33. JORDÀ, Sergi, GEIGER, Günter, ALONSO, Marcos et KALTENBRUNNER, Martin. The reacTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In : *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*. [en ligne]. Baton Rouge Louisiana : ACM, 15 février 2007. pp. 139-146. [Consulté le 3 août 2025]. ISBN 978-1-59593-619-6. DOI 10.1145/1226969.1226998.

34. WEISER, Mark et BROWN, John Seely. THE COMING AGE OF CALM TECHNOLOGY. [en ligne]. 5 octobre 1996. [Consulté le 3 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://web.archive.org/web/19971011215148/http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/acmfuture2endnote.htm>

35. TASIC, VOJKAN. *REAL-TIME FEEDBACK INTERVENTIONS TO REDUCE ENERGY AND WATER CONSUMPTION: A LONG-TERM PERSPECTIVE*. [en ligne]. 2015. [Consulté le 21 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/155239/2/ETH22586.pdf>

36. ISHII, H., UNDERKOFFLER, J., CHAK, D., PIPER, B., BEN-JOSEPH, E., YEUNG, L. et KANJI, Z. Augmented urban planning workbench: overlaying drawings, physical models and digital simulation. In : *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. [en ligne]. Darmstadt, Germany : IEEE Comput. Soc, 2002. pp. 203-211. [Consulté le 21 mai 2025]. ISBN 978-0-7695-1781-0. DOI 10.1109/ISMAR.2002.1115090.

37. VILARINHO, Thomas, FARSHCHIAN, Babak, WIENHOFEN, Leendert W M et FRANANG, Thomas. Combining Persuasive Computing and User Centered Design into an Energy Awareness System for Smart Houses. . 2016. pp. 8.

38. PITTARELLO, Fabio et BRUTTI, Lorenzo. A Public Tangible Interface for Engaging and Informing Young Citizens about Climate Change. . 2019. pp. 6.

39. PLATFORM 24. Chronos. [en ligne]. 11 février 2016. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://rcapplatform24.com/2016/02/11/chronos/>

40. DE BÉRIGNY, Caitilin, GOUGH, Phillip, FALEH, Majdi et WOOLSEY, Erika. Tangible User Interface Design for Climate Change Education in Interactive Installation Art. *LEONARDO*. 2014. Vol. 47, n° 5, pp. 451-456. DOI 10.1162/LEON_a_00710.
41. SUZUKI, Ryo, ZHENG, Clement, KAKEHI, Yasuaki, YEH, Tom, DO, Ellen Yi-Luen, GROSS, Mark D. et LEITHINGER, Daniel. ShapeBots: Shape-changing Swarm Robots. In : *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. [en ligne]. New Orleans LA USA : ACM, 17 octobre 2019. pp. 493-505. [Consulté le 20 mai 2025]. ISBN 978-1-4503-6816-2. DOI 10.1145/3332165.3347911.
42. PORTIER, Hélène. 20°C. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2017. [Consulté le 21 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/5644/20c/>
43. SAGLIO, Pauline. Rewind. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2013. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/6230/rewind/>
44. 非常設計師網. 天氣預報不靠譜 這些設計來彌補. [en ligne]. 12 juillet 2016. [Consulté le 21 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://kknews.cc/design/29rpx3e.html>
45. KASPER, Luca. Dyne Modular System. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2018. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/5526/dyne-modular-system/>
46. CREATIVE REVIEW. Google Seed Studio: Little Signals project. *Creative Review*. [en ligne]. 11 mai 2022. [Consulté le 21 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.creativereview.co.uk/google-seed-studio-little-signals/>
47. MIGRAINE, Elise. Twins objects. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2017. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/5645/twins-objects/>
48. MARTI, Stefan, SEETHARAM, Deva et ISHII, Hiroshi. WeatherTank: A Tangible Interface using Weather Metaphors. . 2001. pp. 2.
49. IATSENIA, Sasha. LittleCubes. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2024. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/7919/littlecubes/>
50. DÉFAYES, Lara. FOMO Survival Kit. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2016. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/5779/fomo-survival-kit/>
51. DRAGICEVIC, Pierre. Limbique: Brain Slices. *List of Physical Visualizations*. [en ligne]. 18 octobre 2012. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://dataphys.org/list/brain-slices/>
52. KIMURA, Hiroaki et NAKAJIMA, Tatsuo. Designing Persuasive Applications to Motivate Sustainable Behavior in Collectivist Cultures. . 30 novembre 2010. pp. 23.
53. ROBBIANI, Alice. Spira. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2014. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/6102/spira/>
54. GOOGLE. Little Signals. *Little Signals*. [en ligne]. 2022. [Consulté le 20 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://littlesignals.withgoogle.com/>
55. FRAYLING, Christopher. Research in Art and Design. . avril 1993. Vol. 1, n° 1, pp. 9.
56. DUDO, Daniel. Designing a Tangible Programming Interface for the Internet of Things. *Internet of Things*. 22 janvier 2018. pp. 140.
57. RITTEL, Horst W J et WEBBER, Melvin M. Dilemmas in a general theory of planning. . 1973. pp. 15.

58. SCHÖN, Donald A. *Designing as reflective conversation with the materials of a design situation*. 1 mars 1992.
59. NIELSEN, Jakob. *Usability engineering*. . Boston : Academic Press, 1993. ISBN 978-0-12-518406-9. 005.1
60. JEFF RUBIN et DANA CHISNELL. *How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. . 2. Wiley Publishing, Inc., 2008. Handbook of Usability Testing. ISBN 978-0-470-18548-3.
61. FØLSTAD, Asbjørn et HORNBÆK, Kasper. Work-domain knowledge in usability evaluation: Experiences with Cooperative Usability Testing. *Journal of Systems and Software*. novembre 2010. Vol. 83, n° 11, pp. 2019-2030. DOI 10.1016/j.jss.2010.02.026.
62. DREAMS INC. SMISKI. **【OFFICIAL SITE】 SMISKI**. [en ligne]. 2016. [Consulté le 4 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://smiski.com/e/smiski/>
63. OPENAI. ChatGPT. [en ligne]. 2025. [Consulté le 5 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://chatgpt.com>
64. ANTHROPIC. Claude Sonnet 4. [en ligne]. 2025. [Consulté le 5 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.anthropic.com/claude/sonnet>
65. MICROSOFT. GitHub Copilot. *GitHub*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 5 août 2025]. Disponible à l'adresse: <https://github.com/copilot>
66. SAURO, Jeff et DUMAS, Joseph S. Comparison of three one-question, post-task usability questionnaires. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Boston MA USA : ACM, 4 avril 2009. pp. 1599-1608. [Consulté le 5 août 2025]. ISBN 978-1-60558-246-7. DOI 10.1145/1518701.1518946.
67. BROOKE, John. SUS: A 'quick and dirty' usability scale. . 1996. pp. 7.
68. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 4, n° 6, pp. 103. DOI 10.9781/ijimai.2017.09.001.
69. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Construction of a Benchmark for the User Experience Questionnaire (UEQ). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 4, n° 4, pp. 40. DOI 10.9781/ijimai.2017.445.
70. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Applying the User Experience Questionnaire (UEQ) in Different Evaluation Scenarios. In : MARCUS, Aaron (éd.), *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience*. [en ligne]. Cham : Springer International Publishing, 2014. pp. 383-392. Lecture Notes in Computer Science. [Consulté le 1 août 2025]. ISBN 978-3-319-07667-6.
71. BUECHLEY, Leah et PERNER-WILSON, Hannah. Crafting technology: Reimagining the processes, materials, and cultures of electronics. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. octobre 2012. Vol. 19, n° 3, pp. 1-21. DOI 10.1145/2362364.2362369.
72. BELL, Fiona, WU, Shanel, CAMPO WOYTUK, Nadia, LAZARO VASQUEZ, Eldy S., ALISTAR, Mirela et BUECHLEY, Leah. Making Biomaterials for Sustainable Tangible Interfaces. In : *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. [en ligne]. Cork Ireland : ACM, 11 février 2024. pp. 1-5. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 9798400704024. DOI 10.1145/3623509.3634740.

Déclaration sur l'usage des IA

Déclaration

Module Travail de Bachelor (TB) - Département COMEM – HEIG-VD

Déclaration sur la conduite des travaux évalués (bonne conduite académique). Les travaux évalués qui ne sont pas accompagnés de ce formulaire seront renvoyés sans être évalués.

Les pratiques frauduleuses identifiées dans le cadre du module Travail de Bachelor peuvent correspondre à l'une ou plusieurs des catégories résumées ci-dessous:

1. Plagiat

Le plagiat consiste à s'approprier le travail d'une autre personne ou d'une autre source et à l'utiliser comme s'il s'agissait du sien. Les travaux comprennent, entre autres, les travaux écrits, les idées, les compositions musicales, les programmes informatiques, les résultats de laboratoire ou d'enquête, les diagrammes, les graphiques, les dessins et les modèles.

2. Collusion

La collusion consiste à travailler avec d'autres personnes sur des tâches qui devraient être effectuées individuellement. La collusion ne doit pas être confondue avec le travail collaboratif qui est parfois utilisé comme moyen d'apprentissage. Sauf avis contraire, tout TB final soumis à l'évaluation doit être produit individuellement par les étudiants.

3. Falsification

Il peut s'agir d'une série d'éléments qui donnent l'impression que l'information a été recueillie par une enquête scientifique, à partir de la compilation des résultats d'un questionnaire, etc., alors qu'en réalité, elle a été inventée ou modifiée pour fournir un résultat plus favorable.

4. Délégation

Il s'agit de tout moyen par lequel une personne ou un service tiers (IA par exemple) effectue un travail pour le compte d'une autre. Il s'agit par exemple de l'obtention de matériel existant ou original à partir de sites ou de services en ligne ou d'autres sources non déclarées.

En soumettant mon rapport de TB et ses annexes, je déclare que :

Ce travail est le mien ;

J'ai dûment détaillé, avant la bibliographie, mon usage des services d'IA générative utilisés (quel service, quand, à quelles fins)

Je suis l'auteur·e des recherches documentaires, analyses et résultats proposés et discutés, qui sont entièrement originaux;

Je n'ai pas falsifié les résultats des recherches, sondages, interviews ou toute autre forme de collecte de données présentés dans mon travail ;

J'ai mentionné toutes les références utilisées dans le texte et dans une liste de référence complète, selon les normes en vigueur (APA7 ou Harvard)

J'ai lu et compris la politique de la HEIG-VD sur la conduite des travaux évalués.

Il est de la responsabilité de l'étudiant·e de prendre connaissance de cette politique et de cette procédure.

Signature _____

Nom : **Jérémy Martin**

Date : **25.06.2025**

Glossaire

Terme	Définition explicative
Adafruit Feather HUZ-ZAH32 ESP32	Microcontrôleur compact avec Wi-Fi et Bluetooth intégré, basé sur l'ESP32. Idéal pour des projets IoT ou des prototypes embarqués.
analyse complète du cycle de vie (ACV)	Méthode d'évaluation environnementale prenant en compte toutes les étapes de vie d'un produit : extraction, fabrication, usage et fin de vie.
API	Interface logicielle permettant à différentes applications d'échanger des données. Utilisée pour connecter des services ou des dispositifs entre eux.
Array	Structure de données représentant une collection ordonnée d'éléments.
Backend	Partie invisible d'une application ou d'un site web, responsable du traitement des données, de la logique métier et de la communication avec les bases de données. C'est ce qui fonctionne côté serveur, à l'inverse du frontend visible par l'utilisateur.
Batterie LiPo	Batterie lithium-polymère, légère et compacte, couramment utilisée dans les projets électroniques et les drones.
Bioplastique	Plastique dérivé de ressources renouvelables (ex. : amidon de maïs). Certains sont compostables dans des conditions industrielles spécifiques.
Bornier	Élément de connexion permettant de relier des fils à un circuit de manière propre et sécurisée.
Buffer (ou tampon)	Composant électronique ou logique servant à isoler, stabiliser ou adapter un signal entre deux circuits.
Buse (impression 3D)	Partie de l'imprimante qui chauffe le filament plastique et le dépose sur le plateau.
Calm Technology	Approche de design intégrant la technologie de manière discrète dans l'environnement de l'utilisateur, pour ne pas perturber son attention.
Capitule	Partie supérieure de la fleur, contenant les fleurs serrées comme chez les marguerites. Dans ce projet, il s'agit de la tête de la fleur où est logée la LED.
ChatGPT / Claude / GitHub Copilot	Outils d'intelligence artificielle générative capables de produire du texte ou du code en réponse à des instructions humaines.
consommation cumulative	Quantité totale d'énergie ou de ressources consommée sur une période définie. Elle permet d'évaluer des tendances de fond.

consommation instantanée	Volume d'énergie ou de données utilisé à un moment donné, souvent représenté de manière visuelle en temps réel.
Data Physicalization	Représentation physique de données abstraites, permettant une interaction tangible et souvent plus intuitive avec l'information.
Débit de données	Vitesse de transfert d'informations sur un réseau, généralement exprimée en Mbps.
Design centré utilisateur (UX)	Ensemble de démarches visant à concevoir des produits en tenant compte des besoins, attentes et comportements des utilisateurs. Cela inclut l'ergonomie, l'utilité, l'accessibilité et la navigation.
Design for Unmaking	Méthode de conception visant à anticiper le démontage, la réparation ou le recyclage d'un objet.
Doodle picture	Croquis rapide permettant de visualiser et tester des idées lors des phases d'idéation ou de brainstorming.
Échelle de fréquence	Outil d'enquête mesurant la fréquence d'un comportement (ex. : rarement, souvent, toujours).
éco-feedback	Système fournissant des retours personnalisés sur l'impact environnemental d'un comportement, dans le but de favoriser des choix plus durables.
Effort cognitif	Charge mentale nécessaire pour comprendre ou utiliser une interface. Un effort élevé peut générer de la frustration ou d'abandon.
Empreinte carbone	Quantité de gaz à effet de serre émise directement ou indirectement par une activité, mesurée en équivalent CO ₂ .
Énergie grise	Énergie totale utilisée pour produire, transporter, utiliser et éliminer un produit.
ESP32	Microcontrôleur à faible coût avec Wi-Fi et Bluetooth intégré, très utilisé dans les projets de type IoT ou embarqués.
Expérience utilisateur (UX)	Ensemble des ressentis, perceptions et réactions d'un utilisateur lors de son interaction avec un produit ou service. L'UX vise à rendre cette expérience fluide, utile, agréable et adaptée aux besoins réels des utilisateurs.
Fichier de maillage (3D)	Fichier représentant un objet 3D (souvent au format STL ou OBJ), utilisé en impression 3D ou simulation.
Flux réseau	Volume de données transitant via une connexion internet ou un réseau local.
Freewriting	Technique d'idéation libre par écriture sans contrainte pendant un temps limité, souvent utilisée en phase exploratoire.
Gaine thermorétractable	Gaine isolante qui se contracte sous la chaleur pour protéger les soudures ou connexions.
Gaz à effet de serre	Gases responsables du réchauffement climatique. Incluent le CO ₂ , le méthane, etc.
GND / VCC	GND = masse électrique (0V) ; VCC = alimentation positive. Essentiels dans les branchements électroniques.
idées prospectives	Pistes créatives imaginant des scénarios futurs, souvent utilisées en design fiction ou pour anticiper des usages émergents.
Impact énergétique	Quantité d'énergie utilisée par une activité ou un produit sur tout son cycle de vie.
Impact environnemental	Ensemble des effets (pollution, émissions, déchets...) qu'une activité exerce sur l'environnement.
Impression 3D	Technique de fabrication additive consistant à déposer de la matière couche par couche à partir d'un fichier numérique.

Insight	Apprentissage issu de l'analyse utilisateur révélant un besoin ou une opportunité de conception.
Intelligence artificielle générative (IAG)	Modèle d'IA capable de produire des contenus (textes, images, code) à partir d'instructions simples.
Interaction homme-machine (IHM)	Ensemble des modalités d'interaction entre un utilisateur et un système numérique ou électronique.
Interface tangible (TUI)	Interface physique permettant de manipuler des données ou des fonctions via des objets réels.
IoT (Internet of Things)	Objets physiques connectés à Internet, capables de collecter, traiter ou transmettre des données.
IRL540N	Modèle de MOSFET utilisé pour la commutation de puissance, compatible avec les signaux logiques.
itérative	Qualifie un processus en plusieurs boucles, où les solutions sont testées, ajustées et améliorées en continu (principe clé en UX design).
JSON	Format léger d'échange de données structuré, très utilisé en développement web.
LED RGB	Type de LED capable d'émettre des lumières de différentes couleurs (Rouge, Vert, Bleu) selon l'intensité de chaque canal.
Levier comportemental	Élément déclencheur visant à encourager un changement de comportement.
MakeLab	Laboratoire de fabrication et prototypage de la HEIG-VD, utilisé pour les projets techniques étudiants.
Matériau biosourcé	Matériau issu de la biomasse (plantes, algues, etc.), utilisé comme alternative plus durable aux matériaux fossiles.
métaux rares	Éléments chimiques essentiels à la fabrication des technologies numériques (ex. : lithium, cobalt), mais dont l'extraction a un impact environnemental élevé.
MG90S / SG90	Petits servomoteurs couramment utilisés dans les projets robotiques.
Microcontrôleur	Petit ordinateur programmable embarqué, utilisé pour contrôler des dispositifs physiques.
Mindmap	Carte mentale utilisée pour représenter et organiser visuellement des idées.
MOSFET	Dans ce projet : Transistor de puissance utilisé pour contrôler l'alimentation de charges. Il agit comme un interrupteur électronique permettant d'allumer ou éteindre des éléments selon un signal de contrôle.
mousses biosourcées (biofoams)	Mousses fabriquées à partir de matériaux naturels (comme le maïs ou la canne à sucre), utilisées comme alternative durable aux mousses synthétiques.
Node.js	Environnement d'exécution JavaScript côté serveur, utilisé pour créer des applications backend.
Nudge / Nudging	Stratégie d'incitation douce modifiant un comportement sans contrainte directe, souvent via l'UX.
ONG (Organisation Non Gouvernementale)	Organisation non gouvernementale œuvrant dans l'intérêt public, souvent active dans l'humanitaire ou l'écologie.
Open source	Logiciel ou matériel dont les plans ou le code sont accessibles et modifiables librement.
PLA (Polylactic Acid)	Bioplastique biodégradable souvent utilisé en impression 3D. Fabriqué à partir de ressources végétales.
polarité	Orientation correcte d'un courant électrique (positif/négatif). Respecter la polarité est essentiel pour éviter d'endommager les composants.

Porte logique AND (74HCT08)	Composant électronique ne produisant une sortie "haute" que si toutes les entrées sont hautes.
prise de conscience	Processus par lequel un-e utilisateur-ice réalise l'impact de ses comportements, souvent déclenché par une visualisation ou un retour d'information clair.
Proof of Concept (PoC)	Prototype rapide servant à valider la faisabilité d'une idée ou d'une technologie.
prototypage	Processus de création de versions simplifiées ou fonctionnelles d'un produit, servant à tester des concepts avant leur finalisation.
Purecrea MT3608	Module d'alimentation "step-up" permettant d'augmenter une tension d'entrée pour alimenter des composants plus exigeants.
Qualitatif	Approche de recherche centrée sur l'interprétation des comportements, opinions ou perceptions des utilisateurs.
Quantitatif	Approche de recherche fondée sur des données chiffrées, mesurables et analysables statistiquement.
Recherche documentaire	Collecte structurée de données issues de sources existantes pour documenter un sujet.
Recherche utilisateur	Ensemble de méthodes visant à comprendre les besoins, attentes et comportements des utilisateurs.
Research through Design (RtD)	Méthodologie de recherche où la conception sert d'outil exploratoire pour générer de nouvelles connaissances.
Servomoteur	Moteur à rotation contrôlée électroniquement, permettant des mouvements précis.
Single Ease Question (SEQ)	Question à réponse unique servant à mesurer la facilité perçue d'une tâche par l'utilisateur.
Step-up DC/DC	Convertisseur qui élève la tension d'entrée à un niveau supérieur, utilisé pour l'alimentation de composants spécifiques.
String	Terme informatique pour désigner une chaîne de caractères (texte).
System Usability Scale (SUS)	Questionnaire standardisé pour évaluer l'usabilité d'un système ou d'un produit.
Taraudage	Création d'un filetage interne pour permettre de visser un élément mécanique.
Tension de grille	Paramètre utilisé pour activer ou désactiver certains composants électroniques comme les MOSFETs.
Test utilisateur coopératif	Dans ce projet : méthode de test sous forme d'entretien semi-dirigé, combinant interaction libre et guidée par des questions.
Usabilité	Qualité d'une interface mesurée par la facilité, l'efficacité et la satisfaction ressenties par l'utilisateur lors de son interaction.
User Experience Questionnaire (UEQ)	Questionnaire standardisé évaluant plusieurs dimensions de l'expérience utilisateur, comme l'attractivité, la clarté, ou l'efficacité.
UTF-8	Encodage universel de texte compatible avec la plupart des langues et systèmes.
UX / Expérience utilisateur	Ensemble des ressentis, perceptions et réactions d'un utilisateur lors de son interaction avec un produit ou service. L'UX vise à rendre cette expérience fluide, utile, agréable et adaptée aux besoins réels des utilisateurs.

Verbatim	Citation littérale d'un utilisateur ou d'un participant lors d'un entretien ou test utilisateur.
Veroboard	Plaque de prototypage utilisée pour réaliser des circuits électroniques sans avoir recours à un circuit imprimé.
Wicked problem	Problème complexe et multidimensionnel, sans solution unique, typique des enjeux en durabilité ou design.
Workshop	Atelier collectif réunissant plusieurs participants pour explorer une problématique ou concevoir ensemble une solution.
Wrapping (électronique)	Technique de connexion électrique sans soudure consistant à enrouler un fil autour d'un plot métallique. Utilisée pour le prototypage rapide.
WS2812B	LED RGB adressable individuellement, permettant de créer des effets lumineux complexes avec un seul fil de données.

Annexes

Annexe 01 : Processus d'idéation : How Might We.....	
Annexe 02 : Processus d'idéation : Notes manuscrites.....	
Annexe 03 : Idée 1 : Personnage du numérique	
Annexe 04 : Idée 2 : Fleur qui fane	
Annexe 05 : Modèle 3D de l'idée 1 : Personnage du numérique.....	
Annexe 06 : Modèle 3D de l'idée 2 : Fleur qui fane	
Annexe 07 : Rapport de test : Prototypes basse fidélité	
Annexe 08 : Modèle 3D du Prototype final : Fleur numérique	
Annexe 09 : Fichiers de maillage du prototype final	
Annexe 10 : Schéma électrique	
Annexe 11 : Instructions de montage électronique	
Annexe 12 : Mécanique et câblage du veroboard.....	
Annexe 13 : Guide d'assemblage mécanique.....	
Annexe 14 : Programme ESP32 de la Fleur numérique.....	
Annexe 15 : Serveur WebSocket de test	
Annexe 16 : Serveur de simulation temps réel.....	
Annexe 17 : Simulateur d'usage de la fleur numérique	
Annexe 18 : Rapport de test : Prototype fonctionnel	
Annexe 19 : Pré-étude	
Annexe 20 : Affiche.....	
Annexe 21 : Déclaration de confidentialité	
Annexe 22 : Procès-verbal : Bilan intermédiaire	

Annexe 01

Processus d'idéation : How Might We

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Cette annexe rassemble les questions clés formulées selon la méthode How Might We, couvrant les thèmes de la visualisation énergétique, du nudging, de l'interface tangible, de la data physicalization, de l'interaction numérique et de l'appropriation. Elle constitue la base de réflexion pour les premières pistes de concepts de prototype.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 25 juin 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

Chapitre 1

Visualisation des données énergétiques

- Comment pourrions-nous rendre intuitive et immédiatement compréhensible la visualisation des consommations numériques d'un foyer ?
- Comment pourrions-nous représenter visuellement les impacts énergétiques du numérique de manière à susciter un intérêt constant ?
- Comment pourrions-nous concevoir une interface qui encourage une exploration spontanée des données énergétiques par les habitant-e-s ?

Chapitre 2

Sensibilisation et changement comportemental (Nudge)

- Comment pourrions-nous utiliser les nudges afin d'encourager durablement les comportements numériques écoresponsables ?
- Comment pourrions-nous créer des rappels subtils et positifs qui encouragent la sobriété numérique au quotidien ?
- Comment pourrions-nous inciter les utilisateur·rice·s à réduire leur consommation numérique sans générer de culpabilité ?

Chapitre 3

Interface tangible et interaction utilisateur

- Comment pourrions-nous concevoir une interface tangible qui s'intègre harmonieusement dans l'espace domestique ?
- Comment pourrions-nous rendre l'interface tangible engageante à travers des interactions physiques agréables ?
- Comment pourrions-nous concevoir une interaction tangible qui reste efficace dans le temps, au-delà de la nouveauté initiale ?

Chapitre 4

Data physicalization et visualisation ambiante

- Comment pourrions-nous matérialiser des données énergétiques abstraites de manière perceptible et sensorielle ?
- Comment pourrions-nous utiliser des formes, textures ou mouvements pour communiquer intuitivement les données énergétiques ?

- Comment pourrions-nous concevoir une visualisation ambiante qui soit à la fois informative et esthétique pour l'utilisateur·rice ?

Chapitre 5

Interaction entre numérique et tangible

- Comment pourrions-nous créer une complémentarité optimale entre l'interface numérique et l'interface tangible ?
- Comment pourrions-nous assurer une cohérence dans la représentation des données entre les deux interfaces ?
- Comment pourrions-nous favoriser un parcours utilisateur fluide entre la consultation rapide (tangible) et l'exploration approfondie (numérique) ?

Chapitre 6

Personnalisation et appropriation par les utilisateurs

- Comment pourrions-nous permettre aux utilisateur·rice·s de personnaliser l'interface tangible pour qu'elle résonne avec leurs propres valeurs ?
- Comment pourrions-nous rendre l'interface personnalisable sans complexifier excessivement son usage ?
- Comment pourrions-nous concevoir l'interface pour favoriser une appropriation émotionnelle forte par l'utilisateur·rice ?

Annexe 02

Processus d'idéation : Notes manuscrites

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Cette annexe rassemble les différentes notes manuscrites produites lors du processus d'idéation.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 25 juin 2025

Prototype Notebook

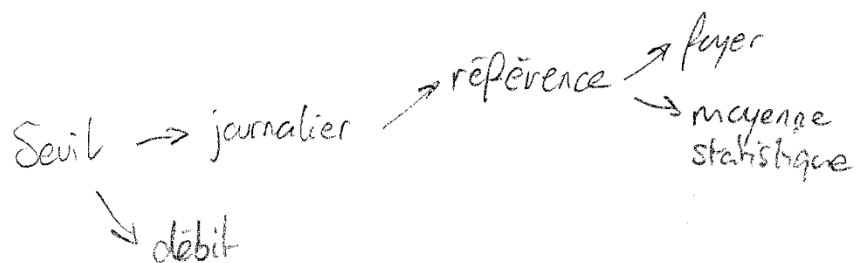
vert = nature + positif

rouge = feu + négatif

Symboles nature:

- Arbre
- Animaux
- Sécheresse
- Fonte des glaciers
- Gaz
- feu
- eau

Trigger



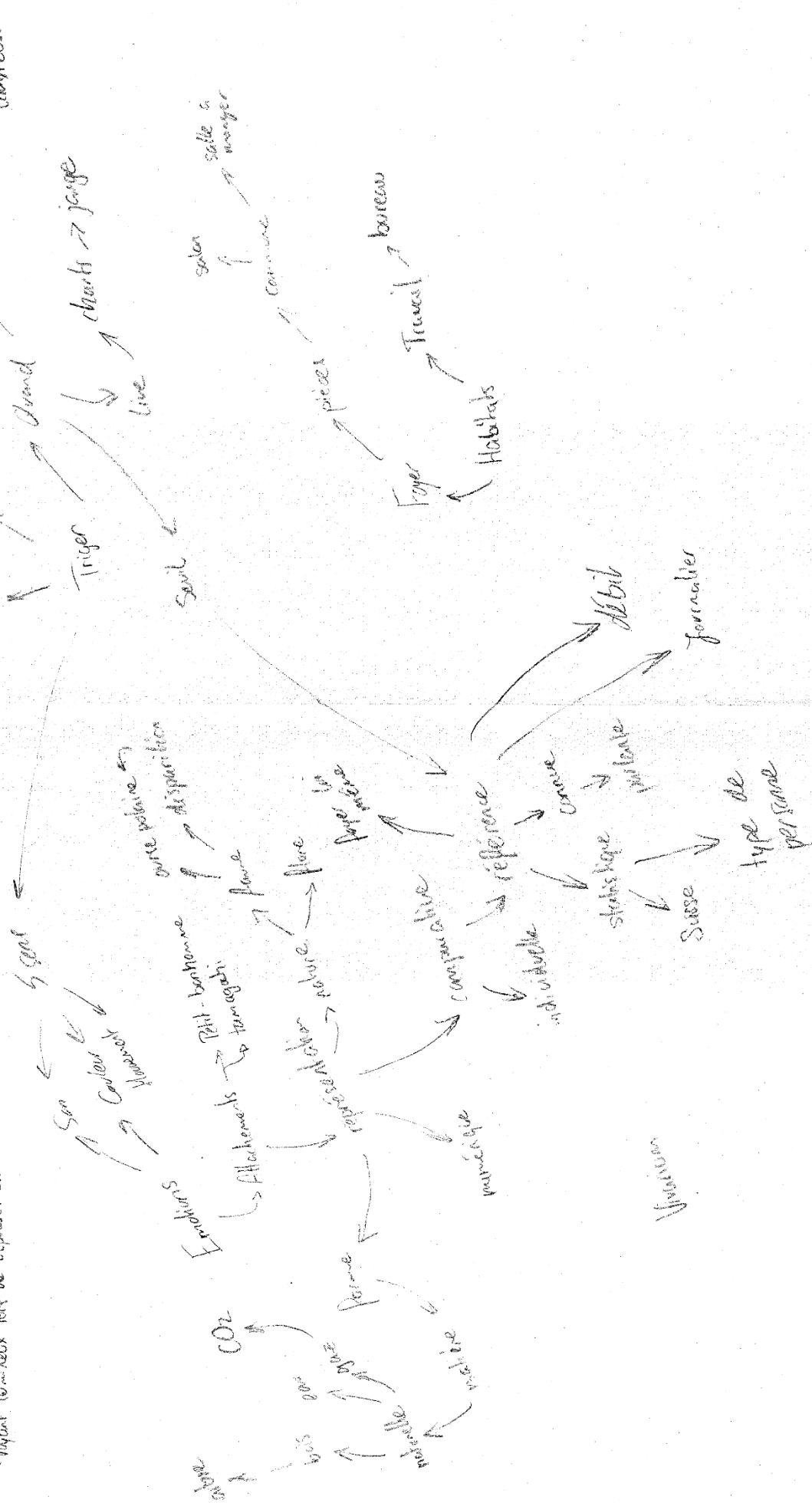
Liquid

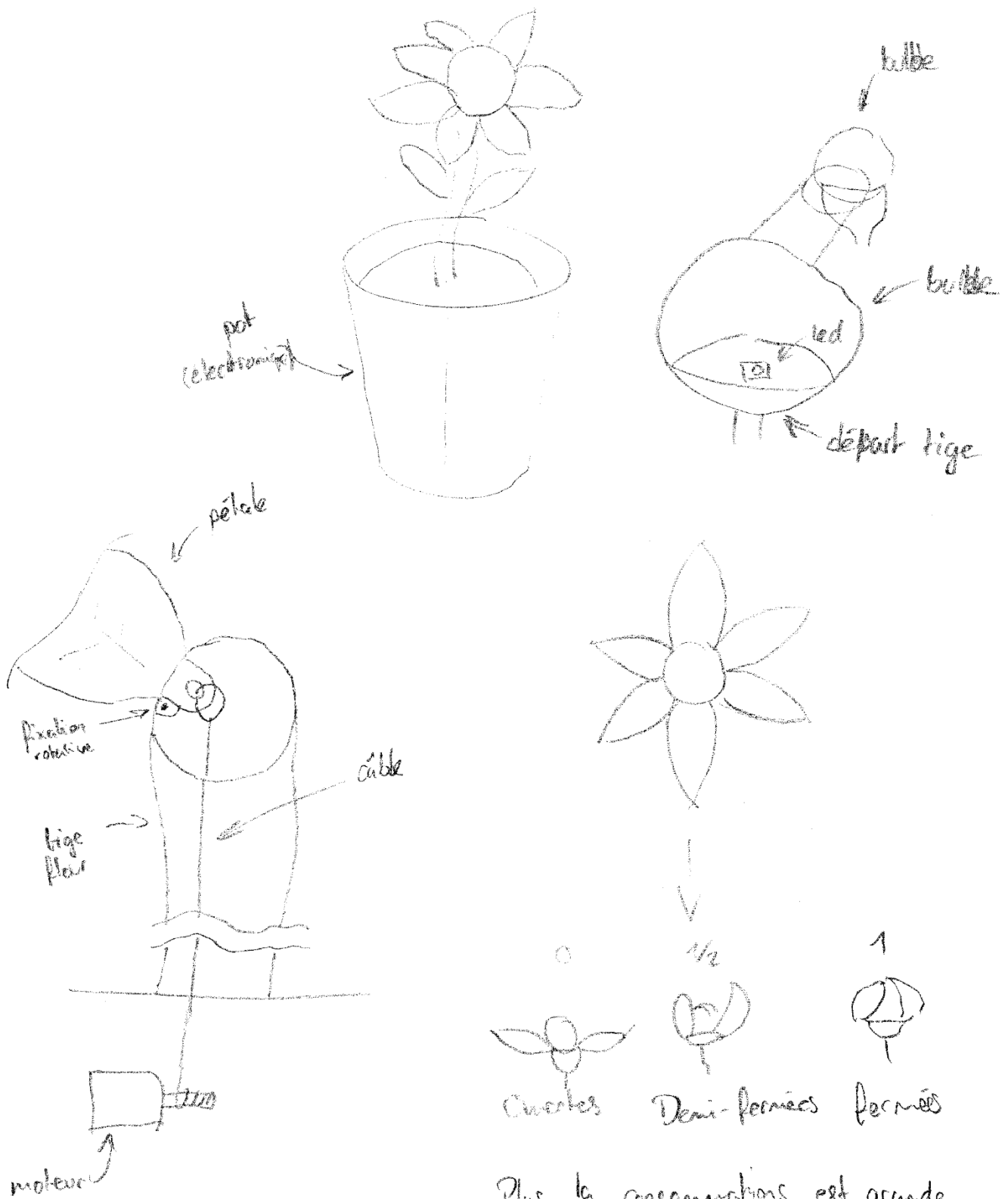
Des prévisions journalières grâce
à des piles de Lego. Des
photos scanner/autres à voir personnellement
de transmettre à l'application les
prévisions.

liquide noir qui tombe sur une représentation plus y a de cascanonien pleure liquide pollue la représentation

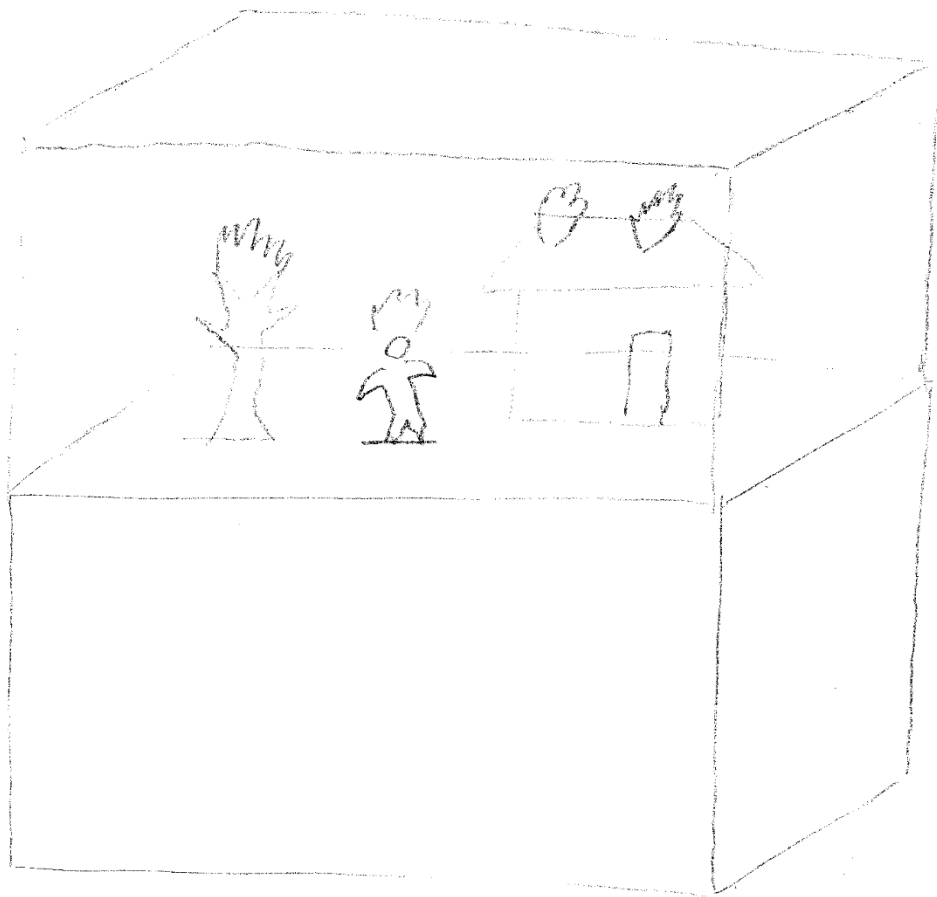


- App qv pour? Comparatif
- Vaut le mieux lors de dépensement?





Plus la consommation est grande
plus les pétales se ferment.



Boîte tamagotchi. Des décors sortent du sol en fonction de l'état de consommation du foyer. Le but est de rendre tangible une interaction tel qu'un tamagotchi.

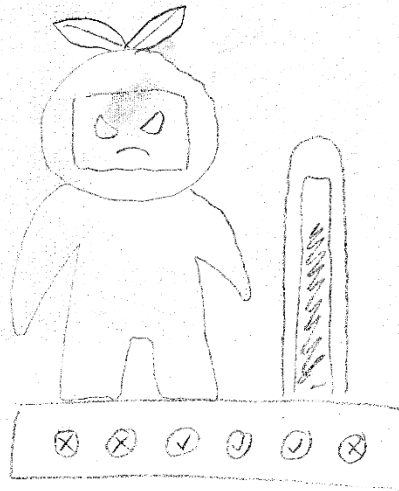
Concepts

Prototype 3

pour avoir les
petits se pensent
en fonction de la
consommation

Représentation
émotionnelle

var génération chat GPT



Jauge
Pour usage journalier
en fonction de l'objectif

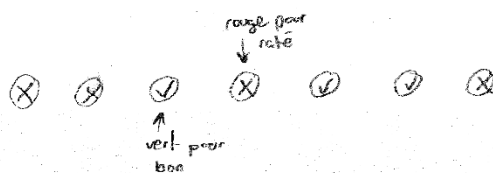


pourrait être un ruban qui tourne pour pas d'écran ou led

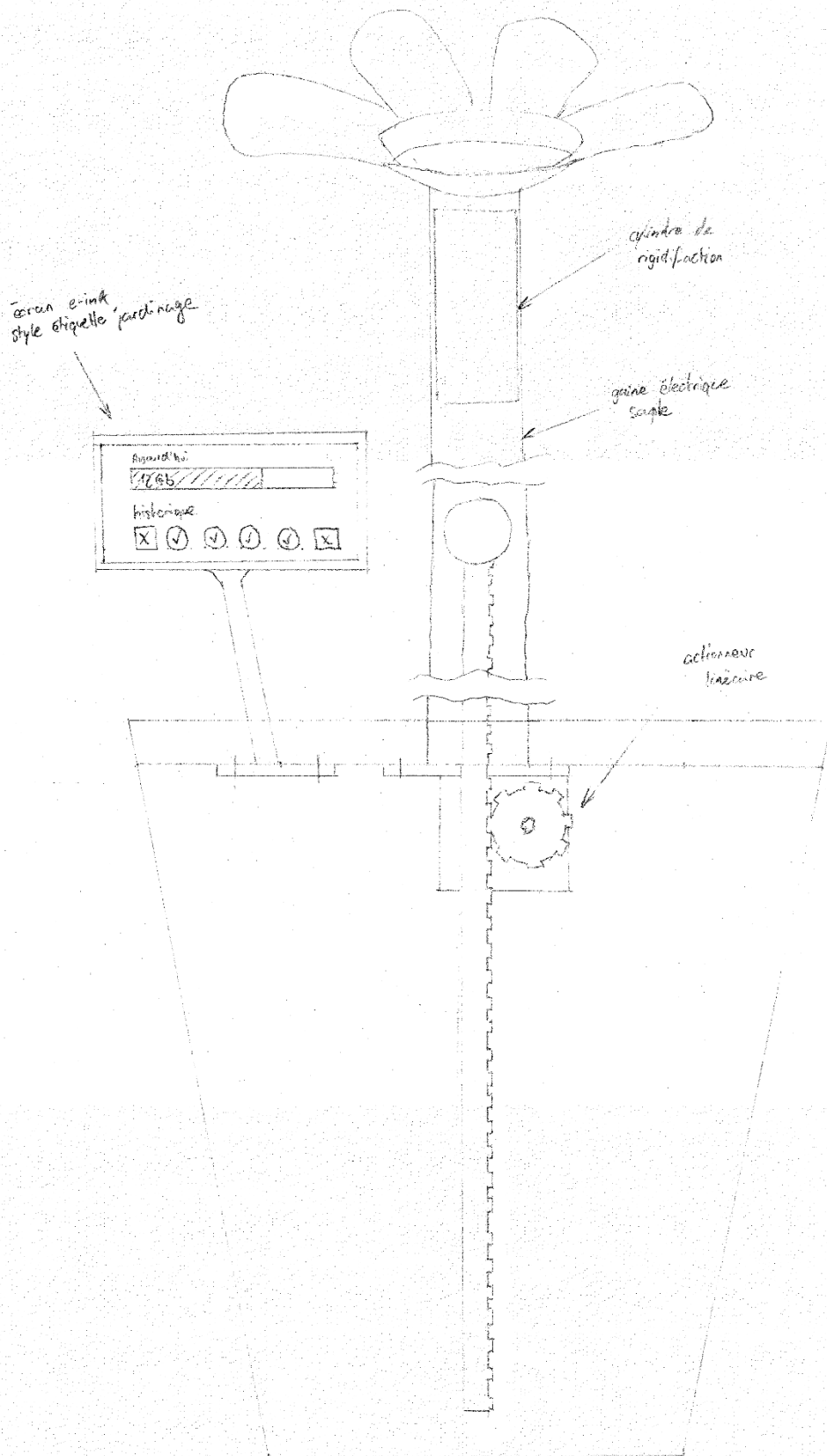
date / stats

Historique

Pour avoir une vue sur les
dernier jours (ex. 7)



Prototype 4



Annexe 03

Idée 1 : Personnage du numérique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Ce document présente un concept d'interface tangible visant à rendre visibles les impacts énergétiques du numérique dans un foyer. L'idée développée prend la forme d'un petit personnage expressif combinant un visage animé (E-Ink), une jauge de consommation quotidienne et un historique hebdomadaire. Le concept s'appuie sur les principes du nudge et d'un design émotionnel pour favoriser des comportements plus responsables. Deux variantes techniques sont proposées selon les contraintes identifiées.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 10 juin 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

II. Table des matières

1. Présentation du concept.....	4
2. Justification du choix.....	5
3. Risques et solutions	6
3.1. E-Ink	6
3.2. Consommation.....	6
3.3. Impression 3D	7
3.4. UX.....	7
3.5. Matrice des risques.....	8
4. Alternatives de conception	8
4.1. Option 1 — Version simplifiée avec jauge mécanique (servo-moteur).....	9
4.2. Option 2 — Version avec un écran E-Ink combinant jauge et historique.....	10
4.3. Synthèse.....	10
5. Plus-values et moins-values	11
6. Conclusion.....	11
Bibliographie.....	12

III. Table des figures

Figure 1 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents.	4
Figure 2 - Matrice Farmer des risques avant mitigation	8
Figure 3 - Matrice Farmer des risques après mitigation	8
Figure 4 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données représentée par une aiguille mécanique (servo-moteur), sur une base simple.	9
Figure 5 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents, réunis sur un seul écran e-Ink.	10

IV. Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparatif de la consommation de différentes plateformes de microcontrôleurs	6
Tableau 2 - Listes des risques et de leur mitigation	8
Tableau 3 - Synthèse comparative des alternatives de conception.....	10
Tableau 4 - Plus-values et moins-values de l'idée	11

1. Présentation du concept

Le concept est une interface tangible prenant la forme d'un petit personnage, dans l'esprit des figurines Smiski (1). Elle se compose de trois sections. La première est son visage, animé par un écran E-Ink. Il affiche des expressions simples, changeantes selon la consommation en cours du foyer, afin de créer une attache émotionnelle. La deuxième est une jauge qui représente visuellement la consommation quotidienne de données par rapport à un seuil prédéfini. La troisième est un historique des jours précédents, composé de coches ou de croix, indiquant si le seuil a été respecté.

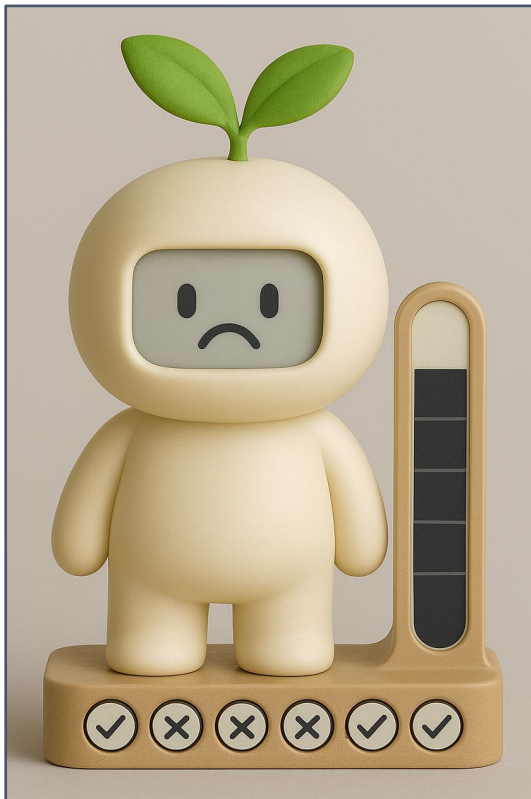


Figure 1 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents.

Après plusieurs itérations, des ajustements ont été demandés pour :

- intégrer une paire de feuilles au sommet du personnage,
- représenter la jauge verticalement,
- transformer l'historique en une série de ronds affichant coche ou croix comme sur de petits écrans e-Ink.
- adapter la couleur de la base (socle brun clair) pour détacher visuellement le personnage du support.

[Image générée le 4 juin 2025]

Ce concept provient de l'atelier d'idéation mené lors de la pré-étude. La participante Leïla, étudiante 3^{ème} année en ingénierie des médias, avait imaginé un petit personnage affiché en continu sur un écran, dont l'environnement se détériore en fonction de la consommation numérique du foyer. L'objectif était de susciter de l'attachement et de responsabiliser les usagers par l'empathie. L'interface actuelle transpose cette idée en objet tangible, combinant expressivité, sobriété et lisibilité.

Je me suis également inspiré de projets existants qui renforcent cette approche. *Remind Me I'm Alive* (2) montre comment un objet expressif, même discret, peut capter l'attention et susciter de l'attachement. Il a aussi inspiré l'usage de l'écran E-Ink pour afficher les émotions du visage. *Caspo* (3) explore le potentiel d'un routeur interactif pour visualiser la consommation numérique et encourager une régulation douce. Enfin, le personnage-humidificateur de Yanko Design (4) illustre comment un objet utilitaire doté d'un visage peut générer une relation affective et durable. Son design a inspiré l'ajout de feuilles au-dessus du personnage.

2. Justification du choix

Le choix de cette interface repose sur une combinaison entre représentation émotionnelle et visualisation statistique, visant à informer tout en suscitant un engagement affectif. L'idée n'est pas née d'un mode de visualisation, mais d'abord d'un travail sur les données pertinentes à transmettre aux utilisateurs. Trois axes ont ainsi structuré la conception : une représentation émotionnelle (le visage), une jauge quotidienne, et un historique synthétique. Ce triptyque permet d'offrir à la fois un signal émotionnel immédiat, une lecture claire de la situation présente, et une mise en contexte sur plusieurs jours.

- **Représentation émotionnelle**

La représentation émotionnelle par un visage animé vise à déclencher une identification et un lien empathique, conformément aux principes du nudging affectif. Ce levier est documenté comme efficace pour favoriser l'adoption de comportements prosociaux ou écoresponsables lorsqu'il est intégré dans des interfaces incarnées (5). Les références à *Remind Me I'm Alive* (2) et au personnage-humidificateur de Yanko Design (4) montrent que cette approche suscite attention et soin, même dans des objets très simples. Le design anthropomorphique, inspiré des Smiski (1), s'inscrit dans cette logique.

- **Jauge**

La jauge a été choisie pour sa capacité à rendre immédiatement perceptible le niveau de consommation par rapport à un objectif. Selon Chalal et al. (6), les visualisations continues et analogiques comme les jauges facilitent la lecture intuitive de la performance énergétique, réduisent la charge cognitive, et encouragent des ajustements en temps réel. Elles sont recommandées dans les systèmes d'eco-feedback pour leur efficacité à déclencher des comportements correctifs rapides.

- **Historique**

L'historique, quant à lui, permet de contextualiser les performances dans le temps. Il s'agit d'un marqueur simple de la régularité des efforts, qui rend visible le rythme d'adoption du comportement cible. Comme le montre la littérature en visualisation énergétique, les historiques visuels sont utiles pour renforcer la motivation à long terme, en permettant à l'utilisateur de constater des progrès ou de repérer des récurrences dans les écarts (7). Leur simplicité (coches/croix) renforce ici leur lisibilité et leur appropriation dans un cadre domestique.

L'interface applique les principes de la calm technology, tels que définis par Tan, Chen et Peng (8). Elle communique passivement, sans son ni alerte, par des signaux visuels discrets et continus. Elle s'intègre ainsi dans le foyer sans perturber l'attention, tout en restant lisible à tout moment.

Ce concept se distingue ainsi des solutions existantes par sa synthèse entre design émotionnel, lisibilité immédiate et contextualisation dans le temps. Il ne se contente pas d'informer, il engage, sans complexité ni surcharge.

3. Risques et solutions

Avant de valider ce concept, plusieurs risques techniques et de conception doivent être identifiés et anticipés. Cette section présente les principaux risques, ainsi que les solutions envisagées pour garantir la faisabilité et la fiabilité de l'interface.

3.1. E-Ink

L'un des principaux risques identifiés concerne l'usage des écrans E-Ink. Pour mieux les comprendre, voici plusieurs sources introductives sur leur technologie et leur utilisation en projets embarqués :

- DigiKey - How to use an E-Ink display (9)
- Instructables - How to Add an E-Ink Display to Your Project (10)
- E-Ink - How it works (11)

Au-delà de l'écran lui-même, une breakout board est nécessaire. Celle-ci assure l'interface électrique entre l'écran et le microcontrôleur et gère les signaux nécessaires au rafraîchissement du display. Les breakout boards intègrent généralement les composants passifs, le régulateur de tension, et les convertisseurs de logique nécessaires. Elles facilitent la communication avec l'écran via des bus standards tels que SPI ou I2C (12).

Côté coût, les écrans E-Ink restent onéreux. En Suisse, pour une commande avec livraison rapide, il faut compter environ CHF 15 minimum pour un écran avec breakout board. Le site Bastelgarage (13) s'est révélé être la solution la plus fiable et économique localement. Il est toutefois possible de réduire les coûts de moitié en passant par des fournisseurs chinois comme BuyDisplay (14), réputé fiable, mais au prix d'un délai de livraison de plusieurs semaines. Dans le cadre du projet, il est préférable d'opter pour une commande sur Bastelgarage, afin de sécuriser l'approvisionnement et de limiter les risques de retard.

3.2. Consommation

Un autre risque concerne la consommation électrique de l'ensemble du dispositif. Celui-ci doit fonctionner en continu dans le foyer, sans nécessiter d'interaction ni de recharge fréquente. Voici plusieurs options de microcontrôleurs pour piloter les écrans E-Ink et assurer la communication Wi-Fi.

Plateforme	Consommation en deep sleep	Consommation en fonctionnement actif (Wi-Fi actif)	Remarques
ESP32	~10 μ A	~160-260 mA	Faible coût, excellente compatibilité avec E-Ink et Wi-Fi
Arduino Uno + Shield Wi-Fi	~40 mA (pas de deep sleep réel)	~120-200 mA	Moins adapté, moins de RAM pour bufferiser les écrans E-Ink
Raspberry Pi Zero W	~100 mA au repos	~150-300 mA	Pas optimisé pour un fonctionnement basse consommation

Tableau 1 - Comparatif de la consommation de différentes plateformes de microcontrôleurs

3.3. Impression 3D

La conception du boîtier représente également un risque. Je n'ai actuellement qu'une expérience limitée en modélisation 3D, ayant seulement utilisé Catia de manière basique lors de cours de mécanique à l'EPFL.

La conception devra toutefois intégrer plusieurs contraintes, telles que la taille et le positionnement des écrans, l'intégration des composants électroniques, l'accessibilité pour le câblage, ainsi que la stabilité mécanique de l'ensemble.

Pour limiter les risques, je prévois d'utiliser un logiciel plus accessible et adapté à ce type de projet, tel que Fusion 360 (15) ou FreeCAD (16), et de m'appuyer sur des exemples de boîtiers existants pour écrans E-Ink disponibles en open source.

Des itérations rapides en impression FDM (en PLA ou PETG) permettront de valider la conception de manière progressive, avant de réaliser une version finale plus soignée.

3.4. UX

Au-delà des aspects techniques, l'expérience utilisateur représente un risque important dans ce projet. L'attachement émotionnel recherché par l'usage du visage animé repose sur des hypothèses de conception qui restent à valider : le personnage sera-t-il perçu comme sympathique ? Ses expressions seront-elles comprises comme prévu ?

De même, la lisibilité de la jauge et de l'historique devra être testée auprès d'utilisateurs cibles. Un affichage trop discret risquerait de passer inaperçu, tandis qu'un affichage trop chargé pourrait nuire à l'approche calm technology souhaitée. Le choix des pictogrammes, des seuils, et des couleurs devra être conçu avec soin.

Enfin, l'acceptabilité globale de l'objet dans un environnement domestique devra être explorée : son esthétique, son emplacement, et la fréquence de rafraîchissement des informations sont autant de paramètres UX qui pourront influencer son appropriation par les utilisateurs.

Pour limiter ces risques, des tests utilisateurs en amont seront indispensables, dès les premiers prototypes (même en papier ou en maquette numérique). Une approche itérative permettra d'ajuster le design avant la fabrication finale du dispositif tangible.

3.5. Matrice des risques

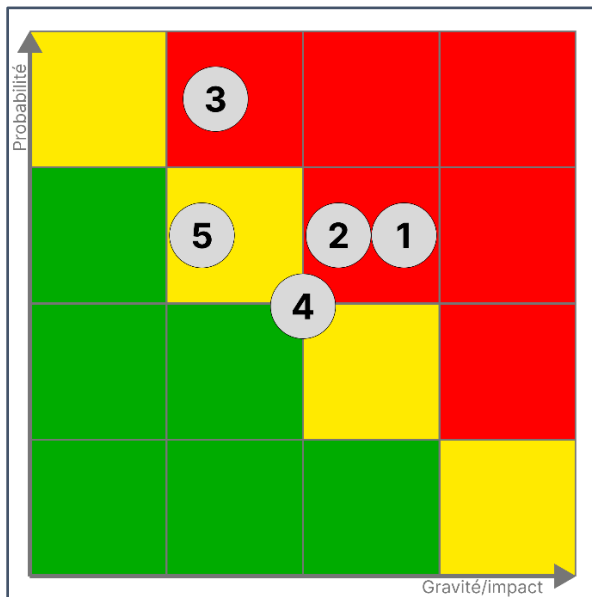


Figure 2 - Matrice Farmer des risques avant mitigation

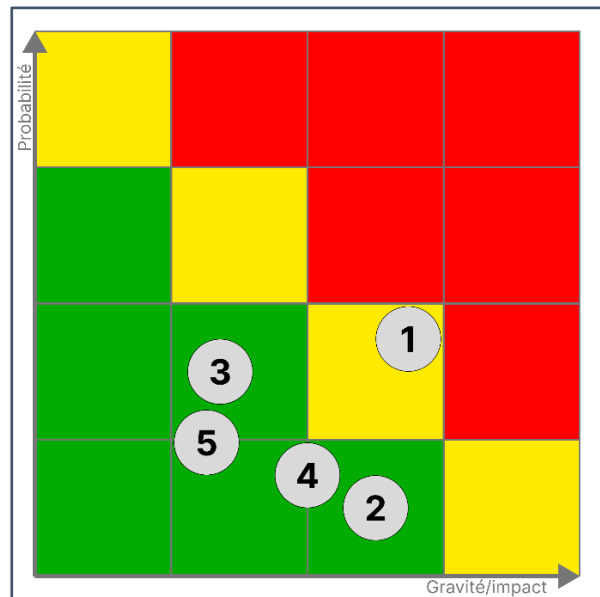


Figure 3 - Matrice Farmer des risques après mitigation

Risque identifié	Mitigation
1. Complexité d'intégration des écrans E-Ink	Apprentissage et utilisation de librairies (GxEPD2)
2. Coût et délai d'approvisionnement des écrans	Commande chez Bastelgarage ou Galaxus en dernier recours
3. Consommation électrique excessive	Choix ESP32 + deep sleep optimisé
4. Difficultés de conception du boîtier (3D)	Logiciel adapté (Fusion 360), impression itérative
5. Risque UX : attachement émotionnel non atteint	Tests utilisateurs en amont, itération

Tableau 2 - Listes des risques et de leur mitigation

4. Alternatives de conception

Suite à l'analyse des risques, en particulier liés à l'intégration et au coût des écrans E-Ink, deux variantes de conception de l'idée de base ont été envisagées. L'objectif est de simplifier l'architecture technique tout en préservant les qualités d'usage attendues.

4.1. Option 1 — Version simplifiée avec jauge mécanique (servo-moteur)



Figure 4 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données représentée par une aiguille mécanique (servo-moteur), sur une base simple.

Cette variante a été conçue après plusieurs itérations à partir de la version 3 (Figure précédente), afin de simplifier l'architecture électronique en limitant le nombre d'écrans e-Ink.

Les ajustements demandés pour cette version étaient :

- remplacer la jauge e-Ink verticale par une jauge mécanique à aiguille, plus expressive en mouvement et moins coûteuse en écrans,
- conserver le visage e-Ink pour maintenir l'attachement émotionnel,
- supprimer l'historique pour simplifier la mécanique et l'interface (trop complexe à représenter de manière tangible en parallèle d'une jauge mécanique),
- conserver une esthétique cohérente et épurée pour faciliter l'intégration dans un environnement domestique.

[Image générée le 6 juin 2025]

Dans cette variante, un seul écran E-Ink est conservé pour l'affichage du visage du personnage. La jauge quotidienne serait remplacée par une jauge physique, animée par un servo-moteur. Ce choix permettrait de :

- Réduire le nombre d'écrans E-Ink nécessaires.
- Renforcer la dimension tangible et animée de l'interface (aiguille réelle).

En contrepartie, cette solution implique une complexité mécanique plus importante : intégration du servo-moteur, conception précise de l'aiguille, des graduations, et de la mécanique associée. De plus, l'historique (sous forme de coches ou croix) serait abandonné, car trop complexe à implémenter mécaniquement.

4.2. Option 2 — Version avec un écran E-Ink combinant jauge et historique



Figure 5 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration représentant un petit personnage de type Smiski avec un visage animé via un écran e-Ink, accompagné d'une jauge de consommation de données et d'un historique des jours précédents, réunis sur un seul écran e-Ink.

Cette variante a été conçue après plusieurs itérations à partir de la version 3. L'objectif était de simplifier l'architecture matérielle en réduisant le nombre d'écrans, tout en conservant l'ensemble des fonctionnalités du concept initial.

Les ajustements demandés pour cette version étaient :

- intégrer la jauge quotidienne et l'historique directement sur un unique écran e-Ink placé en façade basse de la base
- conserver le visage e-Ink pour maintenir l'attachement émotionnel ;

Cette approche permet de réduire le coût matériel (un seul écran pour la jauge + historique) et simplifie le câblage et l'intégration dans le boîtier.

[Image générée le 10 juin 2025]

Cette variante utilise deux écrans E-Ink : un premier pour le visage et un second combinant l'affichage de la jauge de consommation quotidienne et de l'historique des jours précédents. Cette approche présente plusieurs avantages :

- Elle simplifie la conception mécanique (pas de servo-moteur)
- Elle permet de conserver l'historique, intégré sous la jauge sur un même écran.

En contrepartie, cette solution est plus coûteuse en composants (achat d'un second écran E-Ink).

4.3. Synthèse

Critère	Option 1 : jauge mécanique + visage E-Ink	Option 2 : 2 écrans E-Ink
Coût matériel	Plus faible	Plus élevé
Complexité mécanique	Plus élevée	Plus simple
Complexité logicielle	Moyenne (gestion servo + E-Ink)	Plus simple (2x E-Ink)
Conservation de l'historique	Non	Oui
Effet tangible	Fort (aiguille physique)	Moindre

Tableau 3 - Synthèse comparative des alternatives de conception

5. Plus-values et moins-values

Plus-values	Moins-values
Attachement émotionnel via le visage E-Ink	Complexité mécanique accrue si jauge servo adoptée
Visualisation simple et immédiate de la consommation	Perte de l'historique si jauge servo adoptée
Conservation de l'historique dans la version 2 écrans	Coût des écrans E-Ink
Alignement avec les principes de calm technology	Difficilement lisible à faible luminosité
Faible consommation énergétique et présence continue non intrusive	Effort nécessaire pour valider l'attachement émotionnel via tests utilisateurs
Intégration sobre et esthétique dans un environnement domestique	

Tableau 4 - Plus-values et moins-values de l'idée

6. Conclusion

Ce concept transpose les principes du nudging (5), de la calm technology (8) et des bonnes pratiques en visualisation éco-feedback (6, 7) dans un objet tangible à forte dimension émotionnelle. Inspiré d'exemples tels que *Remind Me I'm Alive* (2) ou le personnage-humidificateur de Yanko Design (4), le dispositif mobilise un personnage humanoïde expressif, permettant aux usagers de s'y projeter et d'établir un lien empathique. L'attachement ainsi créé vise à encourager, de manière douce et non intrusive, l'adoption de comportements numériques plus sobres.

L'analyse des risques et l'exploration des variantes de conception ont permis de renforcer la robustesse du concept et d'en clarifier les principaux compromis. Ce travail confirme la pertinence de l'approche incarnée pour enrichir les dispositifs d'éco-feedback au sein de l'espace domestique.

Bibliographie

1. DREAMS INC. SMISKI. *【OFFICIAL SITE】 SMISKI*. [en ligne]. 2016. [Consulté le 4 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://smiski.com/e/smiski/>
2. SCHMID, Livia, SIERRO, Alexine et BELLET, Alain. REMIND ME I'M ALIVE. *ECAL - École cantonale d'art de Lausanne*. [en ligne]. 2024. [Consulté le 4 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://ecal.ch/en/feed/projects/8056/remind-me-im-alive/>
3. MARTINS, Central Saint. Class of 2020: Digital Lives. *Central Saint Martins*. [en ligne]. 2 octobre 2020. [Consulté le 4 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.arts.ac.uk/colleges/central-saint-martins/stories/2020-digital-lives> Last Modified: 2024-02-06T20:19:19+00:00
4. ALBA, Jay. This adorable humidifier + figurine clears up congestion while sparking joy! - Yanko Design. [en ligne]. 25 novembre 2020. [Consulté le 4 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.yankodesign.com/2020/11/24/this-adorable-humidifier-figurine-clears-up-congestion-while-sparking-joy/>
5. THALER, Richard H. et SUNSTEIN, Cass R. *Nudge: improving decisions about health, wealth, and happiness*. . New Haven (Conn.) : Yale university press, 2008. ISBN 978-0-300-12223-7.
6. CHALAL, M.L., MEDJDOUB, B., BEZAI, N., BULL, R. et ZUNE, M. Visualisation in energy eco-feedback systems: A systematic review of good practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2022. Vol. 162, pp. 112447. DOI 10.1016/j.rser.2022.112447.
7. FROEHLICH, Jon, FINDLATER, Leah et LANDAY, James. The design of eco-feedback technology. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Atlanta Georgia USA : ACM, 10 avril 2010. pp. 1999-2008. [Consulté le 4 juin 2025]. ISBN 978-1-60558-929-9. DOI 10.1145/1753326.1753629.
8. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
9. MAKER.IO STAFF. How to Use an E-Ink Display in Your Arduino Project. *DigiKey*. [en ligne]. 12 octobre 2022. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.digikey.com/en/maker/tutorials/2022/how-to-use-an-e-ink-display-in-your-arduino-project>
10. P_LERICHE. How to Add an E-Ink Display to Your Project. *Instructables*. [en ligne]. 2020. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.instructables.com/How-to-Add-an-E-Ink-Display-to-Your-Project/>
11. E INK HOLDINGS INC. Electronic Ink How it works. *Electronic Ink / E Ink Technology*. [en ligne]. 2023. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: https://www.eink.com/tech/detail/How_it_works

12. LADY ADA, DANO WALL, et ISAAC WELLISH. Adafruit eInk Display Breakouts and FeatherWings. [en ligne]. 18 juillet 2018. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://learn.adafruit.com/adafruit-eink-display-breakouts/overview>
13. BASTELGARAGE. Bastelgarage Boutique en ligne d'électronique. [en ligne]. 2025. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.bastelgarage.ch/>
14. EASTRISING TECHNOLOGY CO. China LCD Display Manufacturer for TFT,OLED,e-Paper,Character,Graphic LCD Module. *BuyDisplay*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.buydisplay.com/>
15. AUTODESK. Autodesk Fusion | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software | Autodesk. [en ligne]. 2025. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.autodesk.com/ca-fr/products/fusion-360/overview>
16. THE FREECAD TEAM. FreeCAD: Your own 3D parametric modeler. [en ligne]. 2025. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.freecad.org/>

Annexe 04

Idée 2 : Fleur qui fane

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Ce document présente le concept « Fleur qui fane », une interface tangible visant à rendre visibles la consommation numérique dans un foyer. Le dispositif prend la forme d'une fleur artificielle dont la tige se courbe progressivement en cas de surconsommation, selon une métaphore naturelle intuitive et émotionnelle. L'approche s'appuie sur les principes du nudging, de la calm technology et de l'embodiment physique des données. Ce rapport explore la faisabilité technique, les risques UX, les alternatives d'affichage et les conditions d'acceptabilité dans l'environnement domestique.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 11 juin 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

II. Table des matières

1. Présentation du concept.....	4
2. Justification du choix.....	5
3. Risques et solutions	6
3.1. Mécanique de fanaison.....	6
3.2. Lisibilité de l'état de la fleur.....	6
3.3. Complément d'affichage.....	7
3.4. Acceptabilité dans le foyer.....	7
3.5. Consommation.....	7
3.6. Matrice des risques.....	9
4. Alternatives de conception	9
5. Plus-values et moins-values	11
6. Conclusion.....	11
Bibliographie	12

III. Table des figures

Figure 1 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas, exprimant un état d'alerte ou de surconsommation. Le pot en terre cuite est posé sur une table en bois clair, avec un fond beige lisse. 4

Figure 2 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est droite, avec une tige verte rigide, une tête plate composée de pétales blancs et d'un centre jaune, le tout dans un pot en terre cuite sur une table en bois clair, fond beige. 4

Figure 3 - Matrice Farmer des risques avant mitigation 9

Figure 4 - Matrice Farmer des risques après mitigation 9

Figure 5 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas. Une étiquette de jardin, insérée dans le pot, affiche un écran E-Ink (format 296×152) présentant une jauge horizontale de consommation quotidienne et l'historique des 5 derniers jours (symboles ✓ ou X). Le pot est posé sur une table en bois clair avec un fond beige uniforme..... 10

IV. Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparatif des états de consommation d'un servo-moteur FS90R de FEETECH RC Model Co..... 8

Tableau 2 - Comparatif de la consommation de différentes plateformes de microcontrôleurs 8

Tableau 3 - Listes des risques et de leur mitigation 9

Tableau 4 - Plus-values et moins-values de l'idée 11

1. Présentation du concept

Le concept est une interface tangible prenant la forme d'une fleur. Cette approche vise à proposer un rappel émotionnel lié à la nature : personne n'aime voir une fleur fanée dans son environnement quotidien. L'idée est donc d'incarner visuellement l'état de la consommation numérique du foyer à travers l'état de la fleur. Lorsque la consommation est sobre, la fleur est droite et épanouie. Lorsqu'elle devient excessive, la tige se courbe progressivement et la fleur fane. Ce mécanisme fournit un feedback simple, universellement compréhensible et sans surcharge cognitive.

Le dispositif est composé d'un pot et d'une fleur. La tige sera mécaniquement flexible afin de simuler le fanaïson. La tête de la fleur restera statique, mais son cœur pourra intégrer une LED, permettant de signaler ponctuellement un débit particulièrement élevé ou des pics de consommation.



Figure 2 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est droite, avec une tige verte rigide, une tête plate composée de pétales blancs et d'un centre jaune, le tout dans un pot en terre cuite sur une table en bois clair, fond beige.

Objectif : représenter l'état "fleur en bonne santé" du concept fleur qui fane développé dans le cadre du TB.

[Image générée le 11 juin 2025]



Figure 1 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas, exprimant un état d'alerte ou de surconsommation. Le pot en terre cuite est posé sur une table en bois clair, avec un fond beige lisse.

Objectif : représenter l'état "fleur fanée" du concept fleur qui fane, développé dans le cadre du TB.

[Image générée le 11 juin 2025]

Ce concept est issu d'une itération menée à partir d'une première idée développée lors du cours Approfondissement des Médias, où j'avais exploré l'UX des interfaces tangibles (TUI). La version initiale reposait sur un affichage par pétales, chaque pétale représentant une catégorie de consommation numérique. Cependant, cette approche posait plusieurs problèmes : la signification des mouvements de pétales était difficile à percevoir pour les usagers, et la logique de correspondance entre pétale et catégorie restait ambiguë (problème d'embodiment (1, 2)). Le prototype était aussi mécaniquement complexe.

Le concept actuel simplifie cette lecture en proposant un message unique mais clair. L'état global de la fleur matérialise l'état de la consommation, rendant l'expérience plus intuitive.

2. Justification du choix

Le choix de ce concept repose sur plusieurs enseignements issus de la recherche documentaire et des résultats de l'idéation. L'objectif est de proposer un feedback tangible à forte portée émotionnelle, capable de favoriser des comportements plus sobres sans recourir à des informations chiffrées complexes.

La fleur utilise une métaphore naturelle et universellement comprise. Son état physique agit comme un feedback visuel et émotionnel, en lien direct avec les principes du nudging (3–5) : la fleur fanée incite implicitement les usagers à adopter des pratiques numériques plus responsables, sans contrainte explicite. Ce type de signal s'adresse au système intuitif des usagers, et non à une analyse rationnelle complexe.

La recherche sur les éco-visualisations montre que les métaphores inspirées de la nature renforcent l'impact comportemental, en facilitant l'identification émotionnelle (4, 5). La fleur exploite ce levier en rendant la consommation excessive immédiatement visible, via un changement de forme (fanaison) et de posture.

Par ailleurs, le concept répond aux recommandations en matière de calm technology (6) : l'interface est non intrusive, perceptible en périphérie de l'attention, et ne nécessite pas d'interaction active. Le mouvement lent de la tige, couplé à la présence continue de l'objet dans le foyer, permet une sensibilisation douce et durable.

Enfin, en termes de TUI et de data physicalization, le dispositif renforce la logique d'embodiment (1, 2). Le fanaison global de la fleur fournit un mapping clair et lisible entre la donnée abstraite (niveau de consommation) et son incarnation physique. Ce choix améliore la compréhension par rapport à des concepts plus complexes comme la fermeture indépendante de pétales par catégorie, testée dans les premières itérations.

Ce design unique, en simplifiant le message et en maximisant l'impact émotionnel, permet ainsi de mieux répondre aux besoins identifiés lors de la pré-étude : favoriser une prise de conscience dans le quotidien, par un objet esthétiquement cohérent et émotionnellement engageant, sans imposer de lecture numérique détaillée.

3. Risques et solutions

Avant de valider ce concept, plusieurs risques techniques, UX et de conception doivent être identifiés et anticipés. Cette section présente les principaux points de vigilance relevés, ainsi que les solutions envisagées pour garantir la faisabilité et la robustesse du dispositif.

3.1. Mécanique de fanaison

Le principal risque concerne la faisabilité technique du mécanisme de fanaison de la fleur. Simuler un mouvement de courbure lent, progressif et réversible de la tige implique un choix technologique délicat.

Le mouvement repose sur la flexion contrôlée d'une tige souple, soutenue par une tige intérieure rigide partiellement rétractable (mécanisme par tige crantée ou axe télescopique motorisé). La flexibilité de la tige devra être suffisamment résistante pour éviter un effondrement complet, tout en permettant un coude progressif sous le poids de la tête de la fleur.

Les solutions envisagées sont :

- usage d'un servo-moteur couplé à une tige semi-flexible (gaine électrique, silicone, autres matériaux testés),
- calibration initiale du système pour garantir la répétabilité des positions,
- choix de matériaux adaptés et tests mécaniques progressifs.

Le comportement doit rester lent, silencieux et fluide pour respecter les principes de calm technology (6).

3.2. Lisibilité de l'état de la fleur

Le mapping entre l'état de la fleur et le niveau de consommation numérique repose sur un embodiment fort (1, 2). Le concept doit garantir que ce mapping soit perçu de manière intuitive par les utilisateurs.

Les risques identifiés sont :

- une lecture erronée du message (fleur fanée perçue autrement qu'un signal de surconsommation),
- une perte de lisibilité si le mouvement n'est pas suffisamment visible.

La solution envisagée est de réaliser des tests utilisateurs rapides dès les premières maquettes mécaniques, afin de valider l'interprétation intuitive du fanaison. Pour renforcer cette lisibilité, une étiquette de jardin E-Ink intégrée dans le pot pourrait compléter le feedback visuel en affichant une jauge quotidienne et un historique sur cinq jours. De plus, une notice ou un message explicatif sera fourni lors de l'installation pour accompagner l'appropriation du dispositif.

3.3. Complément d’affichage

Dans le cas où les tests utilisateurs démontreraient un manque de compréhension ou d’information perçue via la seule fleur, l’ajout d’un écran E-Ink sous forme d’étiquette reste envisagé. Ce complément d’affichage comporte toutefois un risque : surcharger visuellement l’objet ou nuire à son embodiment global.

Pour limiter ce risque, l’écran afficherait un contenu minimaliste, cohérent avec les principes de calm technology.

3.4. Acceptabilité dans le foyer

L’acceptabilité du dispositif dans l’environnement domestique constitue un risque important pour ce type d’interface tangible. La littérature en éco-feedback (7), en calm technology (6) et en data physicalization (2) souligne que la qualité de l’intégration d’un dispositif dans le cadre de vie conditionne fortement son adoption et son impact comportemental.

Un objet perçu comme trop gadget, trop technique ou trop intrusif risque d’être ignoré, déplacé voire rejeté. À l’inverse, un artefact perçu comme décoratif, sobre et cohérent avec son environnement augmente les chances de maintien de l’attention dans le temps et facilite la compréhension implicite du message.

Le risque identifié est donc double :

- Rejet esthétique ou symbolique de l’objet par les usagers.
- Perte progressive de sa visibilité et de son impact si le dispositif est relégué ou dissimulé.

Pour limiter ce risque :

- le design sera volontairement sobre et inspiré du monde végétal,
- les matériaux privilégiés (bois, terre cuite, céramique, ou plastiques mats de qualité) viseront à renforcer cette cohérence,
- le feedback lumineux et graphique sera minimaliste, respectant les principes de calm technology.

Des tests utilisateurs en contexte réel permettront de valider ces choix de design avant la finalisation du prototype.

3.5. Consommation

Un autre risque identifié concerne la consommation électrique de l’ensemble du dispositif, qui doit pouvoir fonctionner en continu dans le foyer sans nécessiter d’interaction ni de recharge fréquente.

Si l’option d’affichage E-Ink est retenue (étiquette complémentaire), son impact sur la consommation restera négligeable : l’écran E-Ink ne consomme que lors du rafraîchissement.

Le mécanisme de fanaison de la fleur constitue un point d’attention majeur. L’usage d’un servo-moteur implique des comportements de consommation variables en fonction de son mode de fonctionnement.

État du servo	Consommation typique	Source
À l'arrêt, libre (detach ou PWM désactivé)	≈ 0 mA	Mesure SparkFun et AdaFruit FS90R datasheet (8–10)
En maintien actif, sans couple significatif	≈ 5–6 mA	FS90R datasheet (10)
En mouvement (sans charge)	≈ 100–120 mA	FS90R no-load current (10)
En condition de blocage/stall (sous effort)	≈ 550–800 mA	FS90R stall current (10)

Tableau 1 - Comparatif des états de consommation d'un servo-moteur FS90R de FEETECH RC Model Co.

Le comportement visé pour la fleur nécessite que son état (tige inclinée ou redressée) soit stable dans le temps. Laisser le servo en mode *detach* seul ne serait pas suffisant : sans mécanisme de verrouillage mécanique, la tige risquerait de redescendre sous le poids de la fleur.

À l'inverse, maintenir le servo sous tension en permanence pour lutter contre ce poids entraînerait une consommation importante et peu compatible avec l'objectif de sobriété énergétique.

Pour résoudre ce dilemme, le design mécanique devra intégrer un système permettant un maintien passif de la position :

- mécanisme de blocage mécanique (crantage, friction contrôlée, engrenage autobloquant),
- ou motoréducteur autobloquant (type vis sans fin), qui ne nécessite pas de maintien actif sous tension.

Concernant la LED intégrée au centre de la fleur :

- pour respecter les principes de calm technology, elle ne devra pas rester allumée en continu ;
- son usage sera limité à des signaux événementiels (par exemple, clignotement lent lors de pics de consommation), ou à un rétroéclairage discret en mode sobre (< 2 mA).

Enfin, le choix du microcontrôleur influera sur la consommation globale. Voici un comparatif des plateformes envisagées :

Plateforme	Consommation en deep sleep	Consommation en fonctionnement actif (Wi-Fi actif)	Remarques
ESP32	~10 μ A	~160-260 mA	Faible coût, excellente compatibilité avec Wi-Fi, servo, LED, et gestion fine du deep sleep
Arduino Uno + Shield Wi-Fi	~40 mA (pas de deep sleep réel)	~120-200 mA	Moins adapté, pas optimisé pour basse consommation
Raspberry Pi Zero W	~100 mA au repos	~150-300 mA	Surdimensionné pour ce type de projet

Tableau 2 - Comparatif de la consommation de différentes plateformes de microcontrôleurs

3.6. Matrice des risques

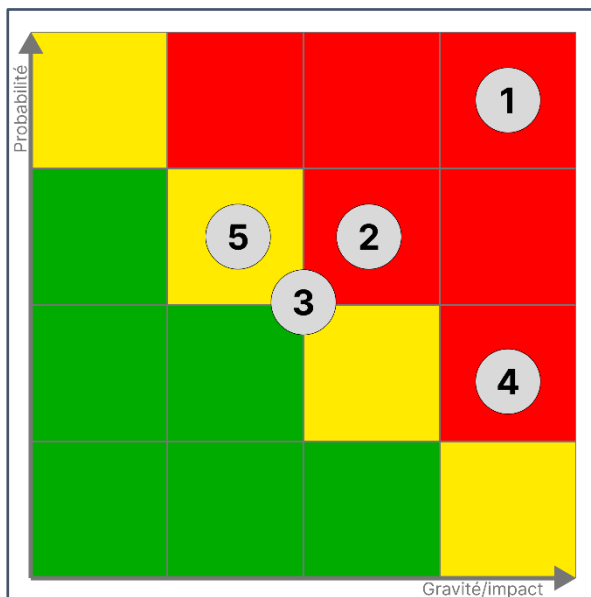


Figure 3 - Matrice Farmer des risques avant mitigation

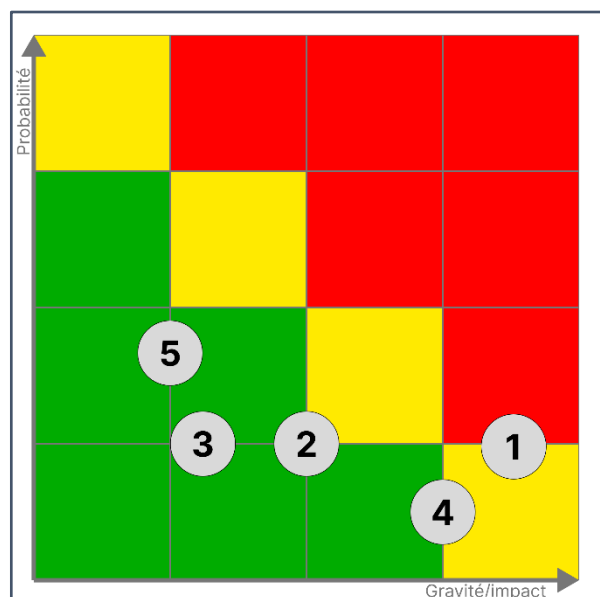


Figure 4 - Matrice Farmer des risques après mitigation

Risque identifié	Mitigation (solution)
1. Complexité du mécanisme de fanaïson	Choix de matériaux adaptés, tests progressifs, calibration fine, intégration d'un mécanisme de blocage passif
2. Lisibilité de l'état de la fleur	Tests utilisateurs, LED d'accompagnement, étiquette E-Ink optionnelle, notice explicative
3. Risque de surcharge visuelle avec l'étiquette E-Ink	Contenu minimaliste sur l'étiquette, étiquette désactivable
4. Acceptabilité dans le foyer	Design sobre inspiré du monde végétal, choix de matériaux naturels, validation UX en contexte réel
5. Consommation excessive du servo-moteur	Intégration d'un mécanisme de blocage passif ou autobloquant pour éviter un maintien sous tension

Tableau 3 - Listes des risques et de leur mitigation

4. Alternatives de conception

Une alternative envisagée consiste à compléter l'interface tangible par un écran E-Ink sous forme d'étiquette intégrée dans le pot. Cet écran pourrait afficher une jauge simple représentant la



Figure 5 - Image générée par ChatGPT, OpenAI. Prompt utilisé : générer une illustration réaliste d'une interface tangible interactive sous forme de marguerite artificielle en pot. La fleur est en état fané : la tige verte est courbée et la tête de la fleur est orientée vers le bas. Une étiquette de jardin, insérée dans le pot, affiche un écran E-Ink (format 296×152) présentant une jauge horizontale de consommation quotidienne et l'historique des 5 derniers jours (symboles ✓ ou X). Le pot est posé sur une table en bois clair avec un fond beige uniforme.

Objectif : représenter l'état "fleur fanée" du concept fleur qui fane, développé dans le cadre du TB.

[Image générée le 11 juin 2025]

consommation quotidienne par rapport à un seuil objectif, ainsi qu'un historique synthétique, par exemple les cinq derniers jours représentés par des coches ou des croix.

Cette solution présente plusieurs avantages. Elle améliore la lisibilité du message pour les usagers souhaitant disposer d'une information plus détaillée, tout en soutenant l'appropriation du dispositif en accompagnant la lecture intuitive de l'état de la fleur. De plus, l'usage de l'E-Ink permet un affichage discret et passif, en cohérence avec les principes de calm technology.

Elle comporte toutefois certains risques. Elle pourrait surcharger visuellement l'objet si le design n'est pas maîtrisé avec soin, et elle pourrait affaiblir l'impact du feedback purement émotionnel en attirant davantage l'attention vers des données chiffrées.

Le choix d'intégrer cette étiquette dépendra donc des résultats des tests utilisateurs (nécessité perçue de complément d'information) et du design final validé en contexte.

5. Plus-values et moins-values

Plus-values	Moins-values
Feedback émotionnel fort et universel (fleur fanée)	Complexité mécanique du mécanisme de fanaison
Métaphore naturelle facilitant l'appropriation et la mémorisation	Risque de surcharge visuelle si étiquette E-Ink mal intégrée ou risque de manque d'informations sans
Compatibilité forte avec les principes de calm technology	Besoin de tests UX pour valider l'interprétation de la métaphore
Présence continue et discrète dans l'espace domestique	Compréhension du mapping dépendante de l'éducation UX initiale
Simplicité d'usage, pas d'interaction active requise	Coût légèrement supérieur en cas d'intégration de l'étiquette E-Ink

Tableau 4 - Plus-values et moins-values de l'idée

6. Conclusion

Le concept de fleur qui fane transpose efficacement les principes identifiés dans la recherche documentaire : embodiment clair (1, 2), feedback émotionnel fort (4, 5), et respect des principes de calm technology (6).

Son principal atout réside dans la force de sa métaphore universelle : une fleur fanée génère un signal émotionnel immédiat, intuitif et lisible en périphérie de l'attention, sans nécessiter de lecture chiffrée. Ce type de feedback renforce la mémorisation et l'appropriation (7), tout en soutenant les comportements sobres par un levier de nudging implicite (3).

Le dispositif proposé combine ainsi une simplicité d'usage, une présence continue non intrusive et un potentiel d'engagement émotionnel élevé, tout en limitant la charge cognitive. Ces qualités en font une approche pertinente et originale pour sensibiliser au quotidien à l'impact énergétique du numérique dans le foyer.

Bibliographie

1. SHAER, Orit et HORNECKER, Eva. Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*. 2009. Vol. 3, n° 1-2, pp. 1-137. DOI 10.1561/11000000026.
2. DUMIČIĆ, Žarko, THORING, Katja, KLÖCKNER, Hermann et JOOST, Gesche. Design elements in data physicalization: A systematic literature review. In : *DRS2022: Bilbao*. [en ligne]. 25 juin 2022. [Consulté le 15 mai 2025]. DOI 10.21606/drs.2022.660.
3. THALER, Richard H. et SUNSTEIN, Cass R. *Nudge: improving decisions about health, wealth, and happiness*. . New Haven (Conn.) : Yale university press, 2008. ISBN 978-0-300-12223-7.
4. RIST, Thomas et MASOODIAN, Masood. Promoting Sustainable Energy Consumption Behavior through Interactive Data Visualizations. *Multimodal Technologies and Interaction*. 21 juillet 2019. Vol. 3, n° 3, pp. 56. DOI 10.3390/mti3030056.
5. CHALAL, M.L., MEDJDOUB, B., BEZAI, N., BULL, R. et ZUNE, M. Visualisation in energy eco-feedback systems: A systematic review of good practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2022. Vol. 162, pp. 112447. DOI 10.1016/j.rser.2022.112447.
6. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
7. FROELICH, Jon, FINDLATER, Leah et LANDAY, James. The design of eco-feedback technology. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Atlanta Georgia USA : ACM, 10 avril 2010. pp. 1999-2008. [Consulté le 4 juin 2025]. ISBN 978-1-60558-929-9. DOI 10.1145/1753326.1753629.
8. ANNE BARELA, LADY ADA, et PHILLIP TORRONE. About Continuous Servo Motors | Make it Move with Crickit | Adafruit Learning System. *Adafruit Learning System*. [en ligne]. 4 juillet 2018. [Consulté le 11 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://learn.adafruit.com/make-it-move-with-crickit/continuous-servo-motor>
9. GRUSIN, Mike et BYRON J. Hobby Servo Tutorial - SparkFun Learn. *SparkFun Learn*. [en ligne]. [Consulté le 11 juin 2025]. Disponible à l'adresse: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/hobby-servo-tutorial/all>
10. FEETECH. FS90R Specification of Product V2.0. [en ligne]. [Consulté le 11 juin 2025]. Disponible à l'adresse: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2442/FS90R-V2.0_specs.pdf

Annexe 05

Modèle 3D de l'idée 1 : Personnage du numérique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Modélisation 3D sous Fusion 360 de la première idée retenue : Personnage du numérique. Ce modèle a permis de réaliser les premiers tests utilisateurs pour évaluer la compréhension et l'attrait de l'idée.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 17 juin 2025

Annexe 06

Modèle 3D de l'idée 2 : Fleur qui fane

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Modélisation 3D sous Fusion 360 de la seconde idée retenue : Fleur qui fane. Ce modèle a permis de réaliser les premiers tests utilisateurs pour évaluer la compréhension et l'attrait de l'idée.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 18 juin 2025

Annexe 07

Rapport de test : Prototypes basse fidélité

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Cette annexe présente le rapport complet du premier test utilisateur comparant deux prototypes basse fidélité (Fleur qui fane et Personnage du numérique) d'une interface tangible de visualisation de l'impact énergétique du numérique. Elle expose les objectifs, la méthodologie, les résultats, l'analyse comparative, le choix du prototype retenu, les problèmes identifiés, les recommandations et l'apport de la méthode de test coopérative.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 31 juillet 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

II. Table des matières

1. Introduction	5
2. Objectifs du test	5
2.1. Hypothèses UX.....	5
2.1.1. Compréhension et lisibilité de l'interface	6
2.1.2. Réactions comportementales et engagement.....	6
2.1.3. Perception émotionnelle et impact narratif	6
2.1.4. Aspects techniques et attentes pratiques.....	6
2.2. Objectifs spécifiques	7
3. Participants	8
3.1. Nombre de participant-es	8
3.2. Profils ciblés	8
3.3. Profils effectifs des participant-es.....	8
3.4. Tendances issues du questionnaire pré-test	9
4. Méthodologie.....	10
4.1. Type de test.....	10
4.1.1. Justification du choix d'un test coopératif	10
4.2. Lieu, matériel et environnement	10
4.2.1. Matériel.....	10
4.2.2. Lieu	11
5. Scénarios de test et tâches	11
5.1. Phase 1 : test individuel des prototypes.....	11

5.2. Phase 2 : évaluation réflexive et comparative.....	12
6. Résultats de la phase 1.....	13
6.1. Fleur qui fane	13
6.1.1. SEQ	13
6.1.2. Tableau synthétique d'analyse / Verbatims.....	13
6.2. Personnage du numérique.....	14
6.2.1. SEQ	14
6.2.2. Tableau synthétique d'analyse / Verbatims.....	14
7. Résultats de la phase 2.....	15
8. System Usability Scale (SUS)	16
9. Problèmes identifiés	17
9.1. Fleur qui fane	17
9.2. Personnage du numérique.....	18
10. Analyse comparative des prototypes.....	18
11. Justification du prototype retenu	19
11.1. Impact émotionnel et levier comportemental	19
11.2. Symbolique et compréhension intuitive.....	19
11.3. Acceptabilité et principes de conception	19
11.4. Perspectives et durabilité de l'impact	20
11.5. Conclusion.....	20
12. Recommandations	20
13. Conclusion.....	22
13.1. Apport d'une méthode de test coopérative	22
14. Bibliographie	23

III. Table des figures

Figure 1 - Plan illustratif de la salle de test et de la dispositions des divers éléments	11
Figure 2 - Matrice de priorisation des problèmes identifiés des deux prototypes	17
Figure 3 – Matrice de priorisation des recommandations	20

IV. Liste des tableaux

Tableau 1 - Synthèse des réponses au pré-test	9
Tableau 2 - Récapitulatif des documents et équipements nécessaires à la conduite du test utilisateur	10
Tableau 3 - Description des tâches individuelles pour chaque prototype	11
Tableau 4 - Questions de comparaison et de réflexion finale.....	12
Tableau 5 - Moyennes SEQ pour le prototype : Fleur qui fane	13
Tableau 6 - Synthèse des retours utilisateur de la phase 1, regroupé par élément observé pour le prototype : Fleur qui fane	13
Tableau 7 - Moyennes SEQ pour le prototype : Personnage du numérique	14
Tableau 8 - Synthèse des retours utilisateur de la phase 1, regroupé par élément observé pour le prototype : Personnage du numérique	14
Tableau 9 - Comparaison des interfaces (Questions 1 à 3 de la phase 2).....	15
Tableau 10 - Usage, acceptabilité et aspects techniques (Questions 4 à 7 de la phase 2)	15
Tableau 11 - Idées, critiques et suggestions des participants (Question 8 de la phase 2).....	16
Tableau 12 - Liste des scores SUS et moyenne	16
Tableau 13 - Problèmes identifiés du prototype : Fleur qui fane	17
Tableau 14 - Problèmes identifiés du prototype : Personnage du numérique.....	18
Tableau 15 - Analyse comparative des prototypes	18

1. Introduction

Ce rapport présente l'analyse du premier test utilisateur réalisé dans le cadre du Travail de Bachelor (TB) intitulé « Conception d'une interface tangible de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer ». Ce test s'inscrit dans une démarche centrée utilisateur, à un stade exploratoire du projet (1), et évalue deux prototypes basse fidélité explorant des concepts d'interfaces tangibles.

L'objectif global est de vérifier dans quelle mesure ces objets permettent aux utilisateur·rices de percevoir intuitivement leur consommation numérique, d'en prendre conscience, et de réagir émotionnellement à cette représentation. En effet, dans un contexte où les usages numériques sont souvent perçus comme « invisibles », ce projet explore le potentiel d'un support physique pour rendre tangible l'empreinte énergétique des comportements en ligne (streaming, réseaux sociaux, cloud...).

Ce test s'inscrit dans la logique du *Research through Design* (2), où les interactions avec les prototypes permettent d'affiner la conception, en validant ou invalidant des hypothèses UX, tout en identifiant des leviers comportementaux à activer (3).

Le présent document décrit le protocole suivi, les objectifs du test, le profil des participant·es, les scénarios et les tâches testées, puis présente une analyse détaillée des résultats observés, accompagnée de recommandations concrètes pour les prochaines itérations de conception.

2. Objectifs du test

Ce test utilisateur évalue deux prototypes basse fidélité conçus dans le cadre du TB. Ces prototypes représentent deux variantes d'une interface tangible destinée à visualiser l'impact énergétique du numérique dans un foyer. L'objectif du test est de déterminer si ces concepts sont compréhensibles sans explication, favorisent une prise de conscience des usages numériques, et suscitent une interaction pertinente et engageante.

2.1. Hypothèses UX

Les hypothèses ont été formulées sur la base de la littérature en UX design, en interfaces tangibles (TUI) et en visualisation éco-responsable, ainsi que des premières analyses menées lors de la pré-étude. Elles visent à anticiper les réactions des utilisateur·rices face aux deux prototypes testés. Elles sont regroupées selon quatre dimensions.

2.1.1. Compréhension et lisibilité de l'interface

- **H1. Compréhension spontanée limitée**
Certains éléments clefs (jauge, historique) ne sont pas intuitivement compris par les utilisateurs. Ils nécessitent une clarification visuelle ou textuelle pour être correctement interprétés.
- **H2. Absence de référence concrète pour estimer l'impact**
Les utilisateurs peinent à juger leur niveau de consommation énergétique faute de repères concrets
- **H3. Nécessité d'un mode d'emploi**
Les utilisateurs ont besoin d'un tutoriel ou d'un mode d'emploi initial pour comprendre le fonctionnement de l'interface tangible.

2.1.2. Réactions comportementales et engagement

- **H4. Manque perçu d'informations détaillées**
Les utilisateurs souhaitent accéder à des données plus précises sur leur consommation, ce qui pourrait justifier une application web complémentaire pour l'affichage de données analytiques.
- **H5. Effet incitatif de la représentation physique**
La visualisation permanente de la consommation énergétique favorise une meilleure prise de conscience et peut inciter à ajuster ses habitudes numériques.

2.1.3. Perception émotionnelle et impact narratif

- **H6. Impact émotionnel différencié selon la métaphore**
Le prototype exploitant une métaphore humaine génère un impact émotionnel supérieur à celui utilisant une métaphore végétale, grâce à un phénomène d'identification.
- **H7. Paradoxe écologique perçu**
Les utilisateurs relèvent une contradiction entre la visée écologique du dispositif et le fait d'introduire un nouvel objet technologique dédié à cet objectif.

2.1.4. Aspects techniques et attentes pratiques

- **H8. Préférence pour un dispositif autonome**
Pour des raisons pratiques, les utilisateurs privilégient un appareil fonctionnant sur batterie ou alimentation autonome plutôt qu'un branchement secteur.
- **H9. Faible charge cognitive attendue**
Une interface tangible correctement conçue doit rester facilement interprétable sans effort cognitif significatif, même pour les utilisateurs non-spécialistes.

2.2. Objectifs spécifiques

Afin de tester ces hypothèses, le protocole d'évaluation poursuit six objectifs principaux.

- **O1. Compréhension intuitive de l'interface**
Évaluer si les signaux visuels ou physiques des prototypes (formes, couleurs, mouvements) sont immédiatement interprétables sans explication préalable (cf. H1, H3, H9).
- **O2. Perception des usages numériques**
Vérifier si les prototypes rendent lisibles les effets des pratiques numériques (streaming, réseaux sociaux...) sur la consommation énergétique (cf. H2).
- **O3. Prise de conscience**
Observer si les interactions avec les prototypes déclenchent une réflexion ou une remise en question des habitudes numériques (cf. H5).
- **O4. Réactions émotionnelles et cognitives**
Comparer les réactions suscitées par chaque prototype pour identifier celui perçu comme le plus engageant, clair ou marquant (cf. H6, H7).
- **O5. Identification des points de friction**
Repérer les incompréhensions, confusions ou obstacles à l'interaction afin d'en tirer des axes d'amélioration (cf. H1, H3, H4, H7).
- **O6. Pistes d'amélioration**
Recueillir des suggestions et des attentes concrètes formulées par les participant·es, en vue du développement d'un prototype fonctionnel (cf. H4, H8).

3. Participants

3.1. Nombre de participant·es

Le test utilisateur a été mené auprès de quatre participant·es, bien que cinq étaient initialement prévus, conformément aux recommandations de Nielsen (1).

Ce nombre légèrement inférieur n'a pas compromis la validité des résultats. Étant donné le caractère exploratoire de cette première phase (3), fondée sur une approche qualitative proche de l'entretien semi-directif, les retours recueillis ont été riches, ciblés et suffisants pour nourrir une première itération de conception.

3.2. Profils ciblés

Les participant·es ont été choisi·es pour leurs usages numériques fréquents, avec des niveaux variés de compétences techniques et de sensibilité écologique. Ces profils ont été retenus pour garantir des retours diversifiés et pertinents dans le cadre de cette phase exploratoire.

Les critères de sélection étaient les suivants :

- **Âge** : entre 20 et 40 ans.
- **Usage fréquent des services numériques** : streaming, réseaux sociaux, navigation web.
- **Sensibilité écologique** : niveau variable, non pris en compte comme critère de sélection, pour observer des réactions spontanées.
- **Compétences techniques** : au moins un profil non technique a été inclus pour tester l'intuitivité de l'interface sans connaissances préalables.

3.3. Profils effectifs des participant·es

L'échantillon est composé de quatre participant·es aux profils variés. Tous déclarent un usage numérique fréquent, avec une moyenne de 4.06/5 sur l'échelle d'usage. Trois disposent de compétences techniques en design ou en programmation, tandis qu'un profil (Aida) présente un niveau plus basique, correspondant à un profil non technique.

La sensibilité à l'impact écologique du numérique est modérée à élevée chez deux personnes, et plus faible chez les deux autres. Tous ont déjà entendu parler des effets environnementaux du numérique, mais seul·e un·e participant·e a déjà tenté de réduire sa consommation pour cette raison. Un seul profil avait déjà utilisé des objets interactifs, ce qui permet d'évaluer les prototypes auprès de personnes majoritairement non familières avec ce type de dispositif.

Les trois profils techniques n'avaient aucune expérience préalable avec des interfaces tangibles, ce qui a limité l'effet du biais technique. Leurs connaissances n'ont pas affecté négativement le test. Au contraire, leur bagage en design ou en développement a permis de formuler des retours plus structurés et exploitables.

	Participant 1	Participant 2	Participant 3	Participant 4
Âge	23	21	28	43
Profession	Étudiant	Étudiant	Étudiante	Assistante d'institut
Compétences en technologie, design ou informatique ?	Oui, en design	Oui, de code et de design	Oui, les 3	Oui, de base (bureautique)
Utilisation du numérique (1=jamais, 5=Très souvent)	4	4.75	3.5	4
Dirais-tu que tu consommes beaucoup de services numériques ?	Énormément	Énormément	Plutôt beaucoup	Moyennement
As-tu déjà tenté de réduire ta consommation numérique pour des raisons écologiques ?	Non	Non	Oui	Jamais pensé à ça
Dirais-tu que tu es sensible à l'impact écologique du numérique ?	Un peu	Moyennement	Assez	Moyennement
As-tu déjà entendu parler des effets environnementaux liés au numérique ?	Oui	Oui	Oui	Oui
As-tu déjà utilisé des objets connectés ou interactifs ?	Non	Non	Non	Oui
Te sentiras-tu à l'aise avec un objet qui communique de l'information par sa forme, sa lumière ou son mouvement (sans écran) ?	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau 1 - Synthèse des réponses au pré-test

3.4. Tendances issues du questionnaire pré-test

Le questionnaire a confirmé que les participant·es utilisent fréquemment des services numériques, mais n'ont qu'une compréhension partielle de leur impact écologique. Leur familiarité avec les objets connectés est faible, bien qu'ils se disent ouverts à des formes d'interaction sans écran.

Les réponses montrent un manque de conscience environnementale spécifique au numérique, associé à une curiosité favorable envers les interfaces tangibles. Ces éléments valident l'intérêt du projet et soulignent la pertinence du dispositif comme outil de sensibilisation.

4. Méthodologie

4.1. Type de test

Le test utilisateur était modéré, mené en présentiel avec un facilitateur. Chaque session individuelle faisait l'objet d'un enregistrement audio et vidéo à l'aide d'un ordinateur portable (Dell XPS 15 9520).

Le test s'inscrivait dans une approche exploratoire, avec des consignes ouvertes et une posture proche de l'entretien semi-directif. L'objectif était de recueillir des retours spontanés.

4.1.1. Justification du choix d'un test coopératif

Le choix d'un format de test coopératif repose sur plusieurs raisons liées à la nature exploratoire du projet et aux objectifs de cette phase. Cette méthode, décrite par Følstad et Hornbæk (2006), permet d'aller au-delà de la simple observation des comportements et de favoriser un échange actif entre le-la participant·e et le modérateur.

- Dans le contexte de ce test, où les prototypes sont à un stade basse fidélité et où la compréhension spontanée est un enjeu central, cette approche présente deux avantages majeurs :
- Valider ou invalider rapidement des hypothèses UX grâce au dialogue direct, tout en captant des insights précis.

4.2. Lieu, matériel et environnement

La réalisation du test utilisateur nécessite la préparation de plusieurs supports et équipements. Listés ci-dessous, ces éléments permettent d'assurer un déroulement rigoureux et reproductible de l'évaluation.

4.2.1. Matériel

Documents	Équipement	Nbre
Mail d'invitation au test utilisateur	Ordinateur (Dell XPS 15 9520) pour la captation vidéo/audio	1x
Formulaire de consentement (vidéo/audio)	Prototypes basse fidélité du « Personnage du numérique »	1x
Script modérateur	Prototypes basse fidélité de la « Fleur qui fane »	1x
Questionnaire pré-test	Table	1x
Fiche des tâches	Chaise	2x
Questionnaire SEQ	Stylo	2x
Questions comparatives et réflexives		
Questionnaire SUS		

Tableau 2 - Récapitulatif des documents et équipements nécessaires à la conduite du test utilisateur

4.2.2. Lieu

Les tests ont eu lieu en salle S155 à la HEIG-VD, un espace calme et neutre.

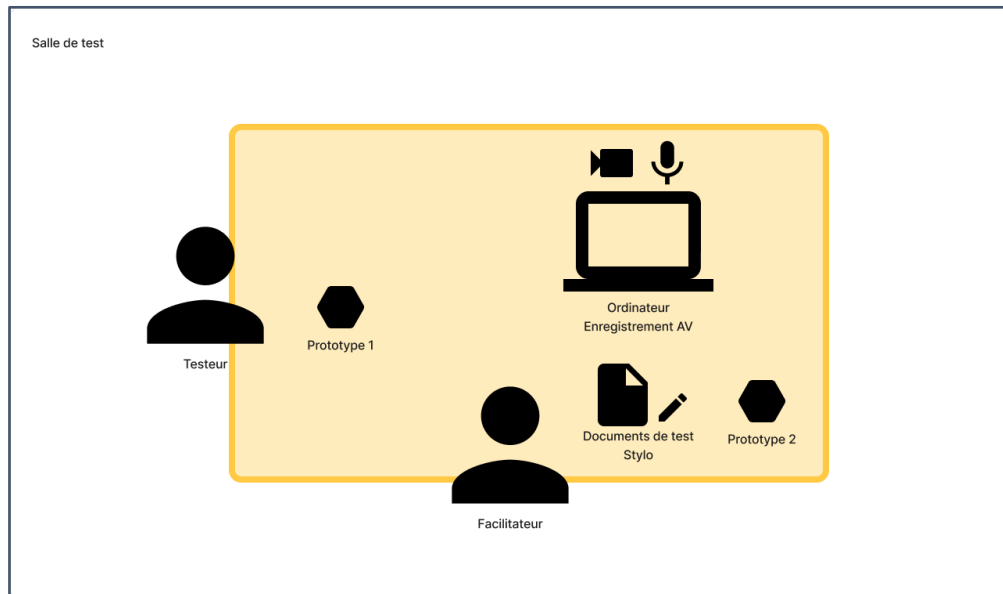


Figure 1 - Plan illustratif de la salle de test et de la disposition des divers éléments

5. Scénarios de test et tâches

Le test utilisateur est structuré en deux phases distinctes. La première consiste en l'évaluation successive des deux prototypes dans un ordre alterné (A puis B ou B puis A) afin de limiter les effets de familiarisation ou de fatigue. La seconde phase est une évaluation globale visant à recueillir un retour réflexif et comparatif sur l'ensemble de l'expérience.

5.1. Phase 1 : test individuel des prototypes

Chaque prototype est exploré à travers quatre tâches successives, décrites ci-dessous :

Tâche	Consigne	Critère de succès	Hypothèses
1	Sans explication, que comprends-tu de ce dispositif ?	Lien spontané avec la consommation numérique	H1
2	Que signifient les différentes parties du prototype ?	Lecture partiellement ou totalement correcte	H1, H3
3	Je vais t'expliquer le fonctionnement imaginé. Donne-moi ton avis.	Compréhension claire, retours pertinents	H2, H4
4	Est-ce qu'avoir ce prototype chez toi te ferait changer quelque chose ?	Réaction émotionnelle ou comportementale	H5, H6

Tableau 3 - Description des tâches individuelles pour chaque prototype

Les deux premières tâches sont réalisées en totale autonomie. L'utilisateur interagit librement avec le prototype, sans aucune indication sur sa fonction ni son fonctionnement. Le seul contexte fourni est celui du projet : rendre visible l'impact du numérique dans les foyers. Cette phase permet d'évaluer l'intelligibilité spontanée de l'objet tangible et la qualité de son *embodiment*.

Les deux tâches suivantes sont guidées. Le modérateur présente, en s'appuyant sur le prototype, le concept imaginé via un échange verbal. Cette approche, proche d'un test coopératif (3), permet de confronter l'intention de conception à l'interprétation utilisateur, tout en générant des retours qualitatifs riches.

5.2. Phase 2 : évaluation réflexive et comparative

Après l'exploration des deux prototypes, une série de questions ouvertes est posée afin d'approfondir les préférences, perceptions et suggestions des participant·es. Ces questions visent à évaluer la lisibilité perçue, l'impact émotionnel, l'acceptabilité et les attentes en matière d'usage et de durabilité.

N°	Question posée	Thématique	Intention UX
1	Lequel des deux prototypes préférez-vous ? Pourquoi ?	Préférence	Évaluer l'engagement, la forme et la compréhension perçue
2	Lequel vous a semblé le plus clair dans sa manière de représenter la consommation ?	Lisibilité	Identifier le prototype le plus compréhensible
3	Lequel vous semble le plus engageant ou impactant émotionnellement ?	Engagement	Observer la projection émotionnelle suscitée
4	Est-ce qu'un tel objet pourrait influencer vos habitudes numériques à la maison ?	Impact potentiel	Estimer l'effet comportemental attendu
5	Que pensez-vous de l'idée d'un objet physique pour rendre visible l'impact du numérique ?	Acceptabilité	Évaluer la pertinence perçue du support tangible
6	Voyez-vous un paradoxe dans le fait de fabriquer un objet pour parler de sobriété numérique ?	Durabilité / éthique	Relever les tensions ou contradictions perçues
7	Préféreriez-vous un fonctionnement sur batterie, en recharge ou en branchement direct ?	Usage technique	Identifier les préférences pratiques et écologiques
8	Avez-vous des idées, critiques ou suggestions pour améliorer ces prototypes ?	Amélioration	Recueillir des pistes concrètes d'optimisation

Tableau 4 - Questions de comparaison et de réflexion finale

Cette phase vise à confronter les deux prototypes du point de vue de la clarté perçue, de l'engagement émotionnel et de leur capacité à déclencher une prise de conscience. Elle permet également d'évaluer l'acceptabilité d'un objet physique dans un foyer, d'identifier les éventuelles tensions entre la visée écologique du prototype et sa matérialisation, et de recueillir des suggestions concrètes d'amélioration en vue des prochaines itérations.

6. Résultats de la phase 1

6.1. Fleur qui fane

6.1.1. SEQ

N° Tâche	Tâche	Moyenne
1	Sans explication, que comprends-tu de ce dispositif ?	5,5
2	Que signifient les différentes parties du prototype ?	5
3	Je vais t'expliquer le fonctionnement imaginé. Donne-moi ton avis.	4,75
4	Est-ce qu'avoir ce prototype chez toi te ferait changer quelque chose ?	4,75

Tableau 5 - Moyennes SEQ pour le prototype : Fleur qui fane

- La tâche 1 obtient le meilleur score (5.50) : le concept est compris intuitivement par la majorité des participants.
- La tâche 2 (5.00) montre que les éléments visuels sont globalement interprétés, mais leur rôle précis reste à clarifier.
- Les tâches 3 et 4 (4.75 chacune) révèlent deux limites :
 - Même après explication, certaines logiques de fonctionnement restent floues (ex. correspondance entre couleurs et posture de la tige).
 - L'impact comportemental perçu est jugé faible ou incertain.

6.1.2. Tableau synthétique d'analyse / Verbatims

Élément observé	Compréhension spontanée	Problèmes identifiés	Suggestions / remarques	Verbatim clé
Forme générale	Compréhension rapide du lien entre la fleur et la consommation énergétique	Impact émotionnel jugé parfois trop négatif si la fleur reste fanée longtemps	Utiliser la fleur sur des périodes courtes (ex. week-end) pour plus de lisibilité	« Si la plante est fanée, ça peut rendre triste, surtout si on est déjà dans un mauvais mood. »
Tige articulée	Perçue comme l'indicateur principal de l'état (droite = bon, penchée = mauvais)	Manque de nuances intermédiaires dans les positions	Introduire des positions intermédiaires pour graduer le feedback	« La plante droite c'est parfait, fanée c'est trop consommé, intermédiaire c'est moyen. »
Couleurs (LED centre de la fleur)	Association claire rouge = mauvais, vert = bon	Confusion si LED et posture communiquent des informations contradictoires	Ajouter une couleur intermédiaire (orange) pour nuancer	« Rouge = consommation élevée, vert = faible, orange = intermédiaire. », « Comme un feu de circulation »

Tableau 6 - Synthèse des retours utilisateur de la phase 1, regroupé par élément observé pour le prototype : Fleur qui fane

6.2. Personnage du numérique

6.2.1. SEQ

N° Tâche	Tâche	Moyenne
1	Sans explication, que comprends-tu de ce dispositif ?	5,5
2	Que signifient les différentes parties du prototype ?	4,75
3	Je vais t'expliquer le fonctionnement imaginé. Donne-moi ton avis.	6
4	Est-ce qu'avoir ce prototype chez toi te ferait changer quelque chose ?	5,25

Tableau 7 - Moyennes SEQ pour le prototype : Personnage du numérique

- La tâche 1 (5.50) montre qu'il est facile d'avoir un avis sur le dispositif. Cette perception est due au fait que le prototype est mécaniquement plus simple.
- La tâche 2 obtient le score le plus bas (4.75) : la signification précise de chaque élément reste à clarifier. Les participants ont eu plus de peine au niveau de l'historique et de la jauge.
- La tâche 3 obtient le meilleur score (6.00) : après explication, le fonctionnement est clair pour les participants.
- La tâche 4 (5.25) indique que l'impact perçu est modéré : le prototype pourrait motiver un changement, mais sans garantie forte.

6.2.2. Tableau synthétique d'analyse / Verbatims

Élément observé	Compréhension spontanée	Problèmes identifiés	Suggestions / remarques	Verbatim clé
Forme générale	Perçu comme un objet ludique et accessible, facilement compréhensible	Signification des éléments visuels peu claire lors de la première interaction	Rendre explicite la fonction de chaque zone dès la découverte	« J'imagine que c'est moi et ma consommation, mais je ne suis pas sûr de ce que représente chaque rond. »
Historique (ronds)	Devine qu'il s'agit d'un suivi sur plusieurs jours	Difficulté à associer chaque rond à un indicateur précis	Utiliser des couleurs (vert, orange, rouge) pour nuancer les jours	« C'est bien d'avoir un historique clair sur une semaine, avec des couleurs intermédiaires. »
Jauge	Comprend qu'elle illustre la progression de la consommation	Position et échelle pas toujours intuitives	Simplifier la représentation ou ajouter des repères visuels	« Si ça se remplit de gauche à droite, ça doit vouloir dire que je consomme trop. »
Écran	Perçu comme source d'informations analytique	Incertitude sur les données affichées en temps réel	Les participants n'ont pas identifié instinctivement un visage	« ...maintenant que tu le dis, ça me paraît évident, un peu comme un Tamagotchi. »

Tableau 8 - Synthèse des retours utilisateur de la phase 1, regroupé par élément observé pour le prototype : Personnage du numérique

7. Résultats de la phase 2

Thème	Tendances observées	Prototype le plus cité	Verbatims clés
Préférence (Q1)	Les participants se partagent entre la Fleur (impact émotionnel) et le Personnage (clarté et précision).	Aucun consensus net.	« Je prendrais quand même le petit bonhomme du, il est plus clair. », « La fleur, c'est plus joli et ça touche plus, mais je comprends moins vite. »
Lisibilité (Q2)	Le Personnage est jugé plus lisible grâce à ses indicateurs directs ; la Fleur demande une interprétation.	Personnage du numérique	« Avec le bonhomme, je sais tout de suite où j'en suis. », « La fleur, il faut que je réfléchisse à ce que ça veut dire. »
Engagement émotionnel (Q3)	La Fleur suscite plus de réaction émotionnelle ; le Personnage est perçu comme plus informatif.	Fleur qui fane	« Voir la fleur fanée, ça me fait réagir. », « Le bonhomme du est sympa, mais il me touche moins. »

Tableau 9 - Comparaison des interfaces (Questions 1 à 3 de la phase 2)

Thème	Tendances observées	Points à retenir	Verbatims clés
Impact potentiel sur habitudes (Q4)	Peu de changements radicaux attendus mais une prise de conscience.	Nécessité de renforcer l'effet incitatif (objectifs, défis). Mais bien pour une phase de prototypage basse fidélité.	« Ça pourrait me faire réfléchir, mais pas sûr que je change vraiment. »
Acceptabilité objet physique (Q5)	Globalement accepté si esthétique et intégré à la décoration.	Importance du design discret et harmonieux.	« Si c'est joli, je le laisse dans mon salon. »
Paradoxe sobriété numérique (Q6)	Opinions partagées : certains voient un paradoxe, d'autres non.	Nécessité de communiquer sur l'éco-conception.	« Oui, c'est un peu contradictoire, sauf si c'est fait en matériaux recyclés. »
Préférence technique (Q7)	Forte préférence pour le rechargeable, avec indicateur de batterie faible.	Éviter le branchement permanent.	« Rechargeable, mais avec une petite lumière quand la batterie est faible. »

Tableau 10 - Usage, acceptabilité et aspects techniques (Questions 4 à 7 de la phase 2)

Axe d'amélioration	Description	Verbatims représentatifs
Hybridation des prototypes	Combiner l'impact émotionnel de la Fleur avec la clarté et les données précises du Personnage.	« J'aimerais une fleur mais avec un petit écran qui montre les chiffres. », « Ce serait bien d'avoir le côté visuel de la fleur et les infos claires du bonhomme. »
Plus d'états intermédiaires	Ajouter des nuances visuelles (couleurs, animations) pour affiner le feedback au-delà du binaire "bon/mauvais".	« Mettre plus d'états pour nuancer les retours. », « On pourrait avoir un état entre le vert et le rouge, pour dire que c'est moyen. »
Connexion avec un suivi applicatif	Proposer un historique, des indicateurs chiffrés et des alertes via une application associée.	« Ce serait bien de voir l'historique sur le téléphone. », « Avoir les données exactes dans une appli aiderait à mieux suivre. »
Expérience personnalisable	Permettre le choix du style visuel et des seuils.	« Ce serait bien de choisir la forme ou la couleur selon ses goûts. », « On pourrait adapter les seuils à notre consommation. »

Tableau 11 - Idées, critiques et suggestions des participants (Question 8 de la phase 2)

8. System Usability Scale (SUS)

Le System Usability Scale (SUS)(4) a été administré une seule fois, à la fin du test, afin d'obtenir un retour global sur l'usabilité perçue d'une solution tangible similaire aux prototypes testés.

L'objectif était d'évaluer la facilité d'utilisation, la clarté et l'efficacité perçues du concept global d'interface tangible pour visualiser sa consommation numérique et son impact, indépendamment des différences entre les deux prototypes.

	Score SUS
Participant 1	90
Participant 2	82,5
Participant 3	82,5
Participant 4	72,5
Moyenne	81,875

Tableau 12 - Liste des scores SUS et moyenne

- Score moyen de 81,9 indiquant une usabilité perçue comme excellente.
- Deux participants se situent aux extrêmes de l'échelle : l'un a perçu une très bonne usabilité et s'est montré très optimiste vis-à-vis du projet, tandis qu'à l'inverse, un autre participant ne se projette pas dans l'utilisation du service et exprime quelques réserves quant à la facilité de prise en main.
- Les deux autres participants présentent des scores intermédiaires et homogènes, traduisant une perception globalement positive du concept.

9. Problèmes identifiés

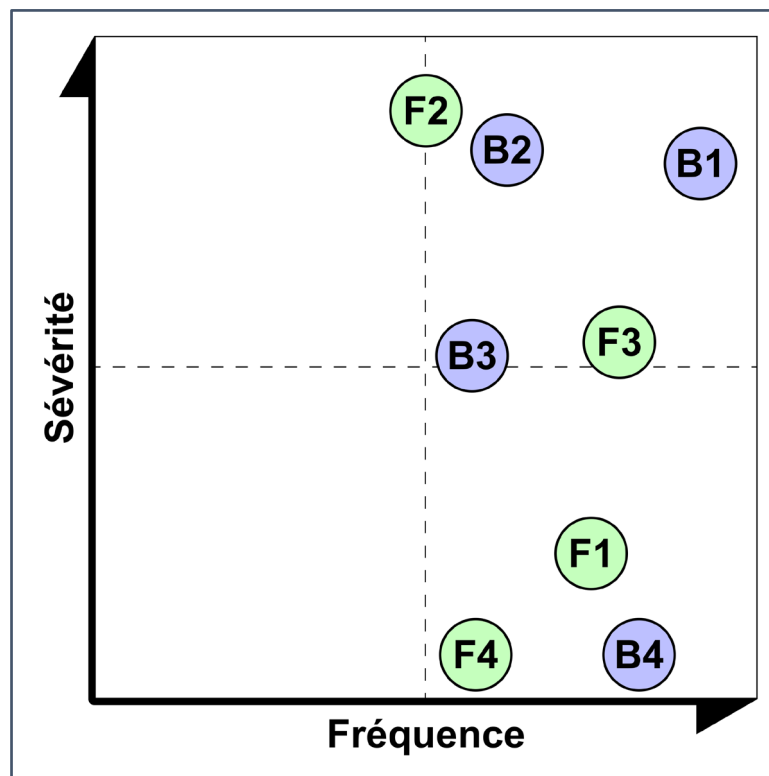


Figure 2 - Matrice de priorisation des problèmes identifiés des deux prototypes

9.1. Fleur qui fane

N°	Problème identifié	Fréquence	Sévérité	Commentaire
F1	Manque de nuances intermédiaires (états de la tige)	Haute	Basse	Les participants ont eu de la peine à se représenter le mouvement de fanaison de la fleur. L'absence d'états intermédiaires empêche une lecture précise et réduit l'efficacité du feedback.
F2	Confusion entre LED et posture	Moyenne	Haute	Incohérence potentielle dans le message visuel de la LED car elle ne transmet pas la même information que l'état de fanaison.
F3	Impact émotionnel négatif si fleur trop souvent fanée	Haute	Moyenne	Risque de démotivation, effet inverse à celui recherché.
F4	Ambiguïté sur le câble et sa fonction	Moyenne	Basse	Problème mineur mais récurrent chez tous les participants. Un câble longe la tige sur le prototype, ce qui a perturbé les participants. Or ce câble était présent uniquement pour tester la faisabilité du mécanisme de redressement via un moteur, et ne correspondait pas à l'usage final prévu.

Tableau 13 - Problèmes identifiés du prototype : Fleur qui fane

9.2. Personnage du numérique

N°	Problème identifié	Fréquence	Sévérité	Commentaire
B1	Historique peu clair (ronds)	Haute	Haute	Les participants comprennent l'idée de suivi, mais pas sa lecture.
B2	Signification des éléments visuels pas explicite (première interaction)	Moyenne	Haute	Freine l'adoption immédiate. Besoin d'un mode d'emploi.
B3	Jauge : position et échelle peu intuitives	Moyenne	Moyenne	Ralentit la lecture, nécessite une clarification graphique.
B4	Écran : non perçu comme un visage	Haute	Basse	Les participants n'ont pas identifié spontanément que l'écran représenterait un visage animé.

Tableau 14 - Problèmes identifiés du prototype : Personnage du numérique

10. Analyse comparative des prototypes

Critère	Fleur qui fane Forces	Fleur qui fane Faiblesses	Personnage du numérique Forces	Personnage du numérique Faiblesses
Impact émotionnel	Forte réaction émotionnelle, visuel marquant	Risque de démotivation si trop souvent fanée	Le visage animé permet aux utilisateurs de se projeter	Engagement émotionnel moins fort
Lisibilité	Message global compris (fanée = négatif, droite = positif)	Confusion posture/LED	Lecture intuitive, compréhension rapide	Historique peu clair, jauge peu intuitive, prise en main difficile
Précision des données	Message analogique plutôt imprécis	Pas de données chiffrées visibles	Données analytiques précises (historique, jauge, écran)	Signification de certains éléments non explicite
Acceptabilité	Esthétique jugée agréable	Impact émotionnel négatif possible	Objet ludique, facilement acceptable	Design perçu comme plus "gadget" par certains
Aspects techniques	Moins de composants électroniques.	Réalisation mécanique compliquée, risque de non-réussite	Conception mécanique simple et l'électronique se limite à des écrans	Possible difficulté au niveau de l'intégration de plusieurs écrans

Tableau 15 - Analyse comparative des prototypes

11. Justification du prototype retenu

Les deux prototypes ont été bien accueillis par les participants, comme le montre le score moyen élevé obtenu au SUS. Ils confirment tous deux le potentiel d'une interface tangible pour visualiser la consommation numérique et son impact environnemental. Toutefois, au vu des objectifs du projet et des enseignements tirés des tests, le choix s'est porté sur la Fleur qui fane.

11.1. Impact émotionnel et levier comportemental

La Fleur a provoqué des réactions émotionnelles plus fortes que le Personnage du numérique. Sa forme et ses mouvements inspirés d'une plante réelle créent une connexion immédiate avec l'utilisateur. Cet impact est un levier efficace pour provoquer une prise de conscience et encourager un changement de comportement. Il devra toutefois être maîtrisé pour éviter un effet négatif si la fleur apparaît trop souvent fanée. Le Personnage, apprécié pour son aspect ludique, a eu un engagement émotionnel beaucoup plus limité, ce qui réduit sa capacité à jouer ce rôle comportemental.

11.2. Symbolique et compréhension intuitive

La symbolique de la Fleur est universelle et liée à la nature. Les participants ont compris spontanément que « tige droite » signifie consommation modérée et « tige fanée » surconsommation.

Le Personnage a, lui, toujours nécessité une explication pour que son fonctionnement et ses indicateurs soient compris. À noter : la Fleur présente un risque de confusion entre le signal LED et l'état de la tige, qui devra être levé.

11.3. Acceptabilité et principes de conception

Les deux prototypes ont été jugés acceptables sur le plan esthétique, mais plusieurs critères de conception orientent vers la Fleur.

Le Personnage ne respecte pas pleinement les principes de *calm technology* (5). Ses écrans e-Ink, sans rétroéclairage, seraient peu visibles dans la vision périphérique et en faible luminosité. Il nécessiterait une action volontaire pour être consulté.

La Fleur, elle, reste visible et active en permanence. Sa tige s'incline ou se redresse lentement au fil du temps en fonction de la consommation, offrant un signal clair et lisible même à distance. La LED, positionnée au centre de la fleur, change de couleur selon le niveau de consommation et reste visible dans toutes les conditions lumineuses, attirant ainsi l'attention sans effort de la part de l'utilisateur. Cette approche répond à la fois aux principes de la *calm technology* (5), en diffusant un signal compréhensible dans la vision périphérique sans interrompre l'utilisateur, et au modèle comportemental de Fogg (6), qui recommande de réduire l'effort nécessaire pour déclencher une action.

11.4. Perspectives et durabilité de l'impact

L'attrait du Personnage semble reposer en partie sur la nouveauté et la curiosité qu'il suscite lors de la première interaction. La Fleur, grâce à sa symbolique et à son embodiment, a plus de chances de maintenir son impact dans la durée.

11.5. Conclusion

La Fleur qui fane combine un impact émotionnel fort, une compréhension intuitive, une bonne acceptabilité et une conception adaptée à un usage domestique durable. Elle est la solution la plus cohérente avec l'objectif du projet : déclencher une prise de conscience et encourager des comportements numériques plus sobres.

12. Recommandations

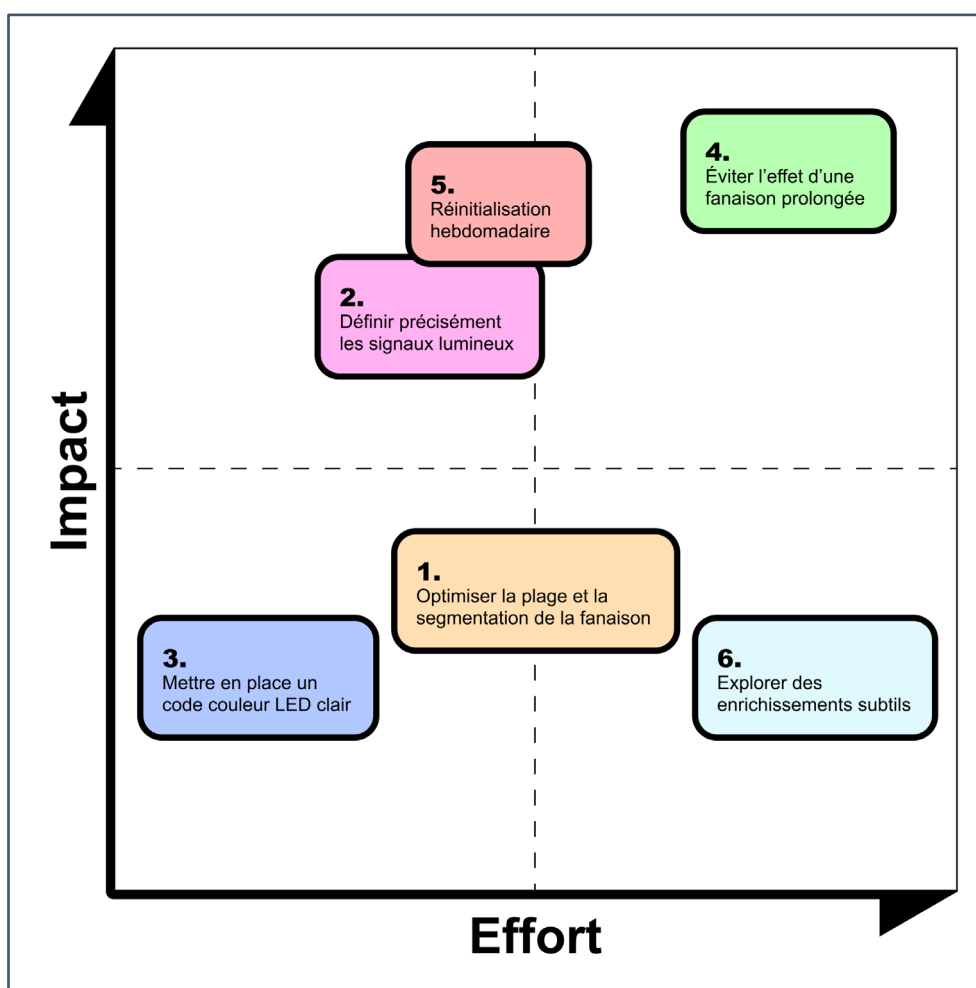


Figure 3 – Matrice de priorisation des recommandations

1. Optimiser la plage et la segmentation de la fanaison

La plage de mouvement de la tige doit être suffisamment grande et segmentée pour que les usagers distinguent clairement les différentes positions. Cette segmentation favorisera une lecture plus fine de l'évolution de l'état de la fleur.

2. Définir précisément les signaux lumineux

Les signaux LED doivent être spécifiquement définis et calibrés, car ils représentent l'un des points les plus critiques pour la compréhension du message. Une attention particulière devra être portée à leur cohérence avec la position de la tige afin d'éviter toute confusion.

3. Mettre en place un code couleur LED clair

Un code couleur normalisé est recommandé :

- Vert : consommation faible
- Orange : consommation moyenne
- Rouge : consommation élevée

4. Éviter l'effet d'une fanaison prolongée

Le système de seuils et de fanaison doit être pensé de manière à éviter que la fleur reste trop longtemps dans un état fané, même en cas de consommation élevée. Un rythme de mise à jour progressif doit être intégré pour rendre la transition plus dynamique et motivante.

5. Réinitialisation hebdomadaire

La plage de mesure retenue est d'une semaine. La fleur devrait se réinitialiser automatiquement à son état de santé maximum (tige droite) chaque lundi, afin de créer un cycle positif et renouveler la motivation des usagers.

6. Explorer des enrichissements subtils

Il est recommandé d'étudier la possibilité d'ajouter des signaux visuels complémentaires, tels que de légères variations de teinte de la LED au centre de la fleur ou des mouvements discrets des pétales, afin de renforcer l'engagement et la dimension tangible de l'interface.

13. Conclusion

Ce test utilisateur a permis de valider la pertinence d'une interface tangible pour rendre visible l'impact énergétique du numérique dans un foyer et d'orienter clairement la suite du projet.

Il a conduit au choix de la Fleur qui fane, retenue pour son impact émotionnel fort, sa compréhension intuitive et sa conformité avec des principes de conception tels que la calm technology (5) et le modèle comportemental de Fogg (6), qui préconisent une visibilité continue et un faible effort cognitif pour déclencher une action.

Les observations et échanges ont permis de définir des recommandations : la plage de mouvement de la tige doit être suffisamment grande, définir précisément les signaux de la LED, éviter que la fleur reste fanée longtemps, plage de mesure hebdomadaire.

La prochaine étape consistera à concevoir et réaliser un prototype final intégrant ces enseignements, afin de valider sa performance et son impact dans un contexte d'usage réel.

13.1. Apport d'une méthode de test coopérative

Le format de test coopératif (cooperative usability testing) s'est avéré particulièrement pertinent pour ce projet. Tel que le décrivent Følstad et Hornbæk (3), cette méthode est bien adaptée aux domaines spécialisés et aux prototypes basse fidélité, en particulier lorsqu'il s'agit d'objets tangibles dont la définition fonctionnelle et visuelle est encore en construction.

Dans le cas présent, la nature même d'un prototype tangible basse fidélité rend difficile l'exécution de tâches standardisées, comme cela peut être le cas pour une interface numérique. L'interprétation et la compréhension du concept doivent se construire en direct, au fil de l'interaction avec le-la participant-e. Le test coopératif répond à cette contrainte en permettant d'introduire des consignes générales, puis d'ouvrir immédiatement la discussion pour explorer les perceptions, les interprétations et le ressenti.

Cette approche favorise la récolte d'insights riches. Elle ouvre ainsi la voie à l'émergence d'idées nouvelles et d'améliorations, qui peuvent être intégrées dès les phases suivantes du développement.

14. Bibliographie

1. NIELSEN, Jakob. *Usability engineering*. . Boston : Academic Press, 1993. ISBN 978-0-12-518406-9. 005.1
2. DUDO, Daniel. Designing a Tangible Programming Interface for the Internet of Things. *Internet of Things*. 22 janvier 2018. pp. 140.
3. FØLSTAD, Asbjørn et HORNBAEK, Kasper. Work-domain knowledge in usability evaluation: Experiences with Cooperative Usability Testing. *Journal of Systems and Software*. novembre 2010. Vol. 83, n° 11, pp. 2019-2030. DOI 10.1016/j.jss.2010.02.026.
4. BROOKE, John. SUS: A 'quick and dirty' usability scale. . 1996. pp. 7.
5. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
6. FOGG, Brian Jeffrey. Fogg Behavior Model - BJ Fogg. *Fogg Behavior Model*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 7 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.behaviormodel.org>

Annexe 08

Modèle 3D du Prototype final : Fleur numérique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Modélisation complète du prototype final dans Fusion 360, intégrant l'ensemble des pièces mécaniques, fixations et éléments électroniques. Ce fichier sert de référence pour la fabrication et l'assemblage de la fleur numérique.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 28 juillet 2025

Annexe 09

Fichiers de maillage du prototype final

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Annexe numérique regroupant l'ensemble des fichiers de maillage (.3mf) des différentes pièces du prototype final, ainsi que des fichiers préconfigurés pour l'impression 3D.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

Annexe 10

Schéma électrique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Schéma électrique de la fleur numérique présentant l'organisation et les connexions nécessaires au fonctionnement du prototype.

Etudiant : Jérémy Martin

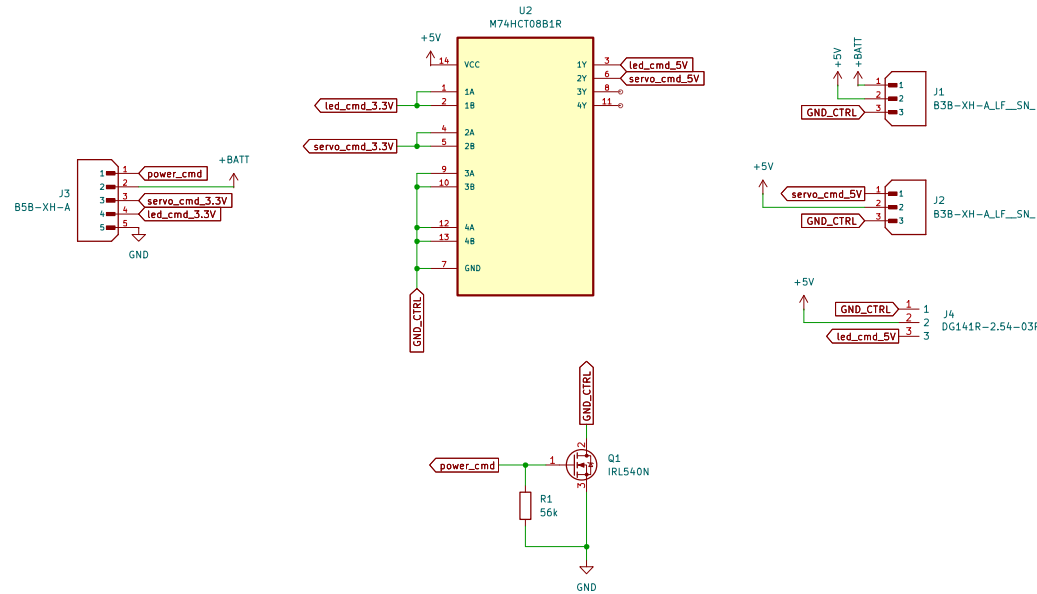
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

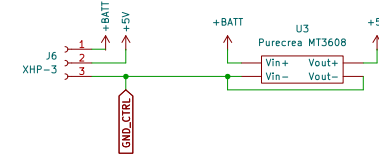
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 28 juillet 2025

Veroboard

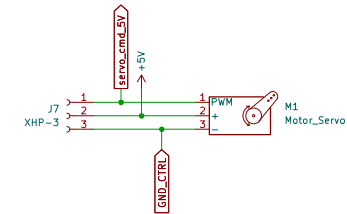


Purecrea MT3608



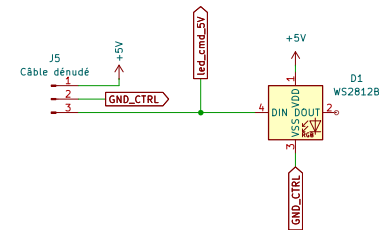
Réglez la tension de sortie à l'aide du potentiomètre avant de connecter l'alimentation au veroboard. Risque de surtension !

MG90S



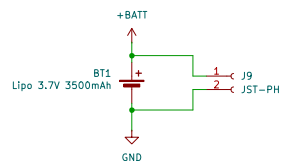
Si vous conservez les connecteurs JR, faites attention : ils ne possèdent pas de détrompeur, ce qui augmente le risque d'inversion lors du branchement.

LED WS2812B



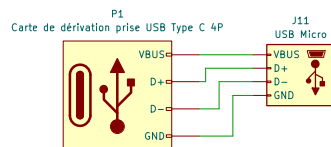
Par souci de simplicité, une LED provenant d'un ruban LED a été utilisée. Elle est soudée directement sur une section de bande autocollante. Un condensateur a également été ajouté pour stabiliser légèrement la tension d'entrée (non représenté sur le schéma).

Batterie Lipo



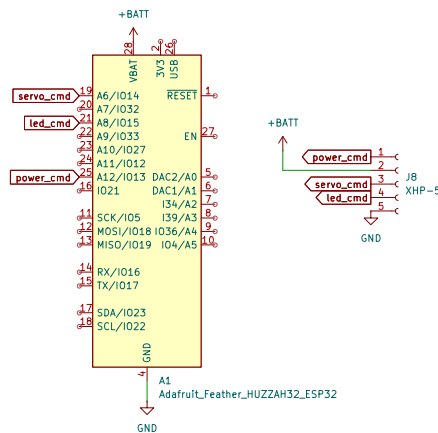
Vérifiez la polarité du connecteur avant de le brancher à l'Adafruit Feather HUZZAH32 (ESP32). Une inversion pourrait endommager la carte.

USB Type C à USB Micro



Le connecteur Micro-USB se branche directement sur l'Adafruit Feather HUZZAH32 (ESP32).

ESP32



Annexe 11

Instructions de montage électronique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Le document fournit un guide pour préparer et assembler l'électronique de la « fleur numérique », interface tangible du projet.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

II. Table des matières

Liste des éléments électroniques	3
1. Vérification initiale	4
2. Module MT3608.....	4
2.1. Réglage de la tension de sortie	4
2.2. Câblage.....	4
3. Servomoteur MG90S.....	4
4. Batterie LiPo	5
5. ESP32.....	5
6. Adaptateur USB Type-C vers Micro USB	5
6.1. Type-C	5
6.2. Micro-USB	5
7. Veroboard	5
8. LED WS2812B	6
9. Assemblage final	6
Bibliographie.....	6

III. Table des figures

Figure 1 - Illustration montrant le sens des connecteur XHP (1)	4
---	---

IV. Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des éléments électroniques de la fleur numérique	3
--	---

Liste des éléments électroniques

Ref	Qty	Value	Datasheet	Fournisseur
A1	1	Adafruit Feather HUZZAH32 ESP32	https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-huzzah32-esp32-feather.pdf	MEI
BT1	1	Lipo 3.7V 3500mAh		https://www.bastelgarage.ch/batterie-lipo-3500mah-jst-1-25-lithium-ion-polymere
D1	1	WS2812B	https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf	
J1, J2	2	B3B-XH-A	https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf	MakeLab HEIG-VD
J3	1	B5B-XH-A	https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf	MakeLab HEIG-VD
J4	1	DG141R-2.54-03P		MakeLab HEIG-VD
J6, J7	2	XHP-3	https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf	MakeLab HEIG-VD
J8	1	XHP-5	https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf	MakeLab HEIG-VD
J9	1	PHR-2	https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/ePH.pdf	MakeLab HEIG-VD
J11	1	USB Micro		https://www.bastelgarage.ch/cable-micro-usb-2-0-de-0-3m-bleu
M1	1	MG90S	https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG90S_Tower-Pro.pdf	MakeLab HEIG-VD
P1	1	Carte de dérivation prise USB Type C 4P		https://www.bastelgarage.ch/carte-de-derivation-prise-usb-type-c-4p
Q1	1	IRL540N	https://www.vishay.com/docs/91300/irl540.pdf	MakeLab HEIG-VD
R1	1	56k		MakeLab HEIG-VD
U2	1	74HCT08	https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hct08.pdf?ts=1753628369322	MakeLab HEIG-VD
U3	1	Purecrea MT3608	https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf	MakeLab HEIG-VD
	1,5m	Câble 0,10mm2	https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001764414DS00/fiche-technique-1764414-helukabel-15100-conducteur-individuel-lify-1-x-0-10-mm-vert-100-m-1764414.html	https://www.conrad.ch/fr/p/helukabel-15100-conducteur-individuel-lify-1-x-0-10-mm-vert-100-m-1764414.html
		Divers câble > AWG26		

Tableau 1 : Liste des éléments électroniques de la fleur numérique

1. Vérification initiale

- 1.1. À l'aide de la liste des composants électroniques, assurez-vous de disposer de tous les composants et du matériel requis.

2. Module MT3608

2.1. Réglage de la tension de sortie

- 2.1.1. Connecter **Vin+** et **Vin-** à une alimentation externe.
- 2.1.2. Brancher un multimètre sur la sortie **Vout**.
- 2.1.3. Régler la tension à **5 V** en ajustant le potentiomètre.

2.2. Câblage

- 2.3. Utiliser un câble plat > AWG26, **3 fils** (noir, brun, rouge), longueur **15 cm**.
- 2.4. Sertir et brancher un connecteur **XHP-3** sur un côté (respecter le sens).

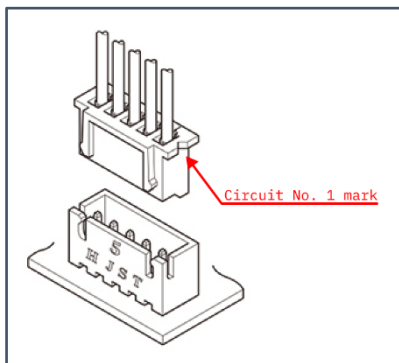


Figure 1 - Illustration montrant le sens des connecteur XHP (1)

- 2.5. Souder l'autre extrémité :

- **Rouge** → Vin+
- **Brun** → Vout+
- **Noir** → Vout-

3. Servomoteur MG90S

- 3.1. Couper le connecteur d'origine.
- 3.2. Sertir et installer un nouveau connecteur XHP-3.
- 3.3. Respecter l'ordre des fils.

4. Batterie LiPo

- 4.1. Retirer le connecteur existant.
- 4.2. Installer un connecteur JST-PH.
- 4.3. Vérifier la polarité avant soudure (BAT+ et BAT- sont indiqués sur l'ESP32).

5. ESP32

- 5.1. Utiliser un câble plat > AWG26, 5 fils (noir, brun, rouge, orange, jaune), longueur 15 cm.
- 5.2. Sertir et brancher un connecteur XHP-5 sur un côté (respecter le sens).
- 5.3. Souder l'autre extrémité :
 - Jaune → 15 / A8
 - Orange → 14 / A6
 - Rouge → BAT
 - Brun → 13 / A12
 - Noir → GND

6. Adaptateur USB Type-C vers Micro USB

6.1. Type-C

- 6.1.1. Utiliser 4 fils > AWG26 (noir, vert, blanc, rouge), longueur 15 cm.
- 6.1.2. Souder sur le PCB Type-C :
 - Rouge → V
 - Blanc → D-
 - Vert → D+
 - Noir → G
- 6.1.3. Passer les fils à travers la pièce 3D prévue pour le montage.

6.2. Micro-USB

- 6.2.1. Démonter délicatement un câble micro USB 0,3 m bleu pour récupérer le connecteur.
- 6.2.2. Dessouder les fils d'origine.
- 6.2.3. Souder les nouveaux fils aux mêmes positions.

7. Veroboard

- 7.1. Découper la plaque selon le plan fourni.
- 7.2. Préparer les composants.
- 7.3. Souder du plus petit au plus grand, en respectant le sens des connecteurs.
- 7.4. Réaliser les connexions selon le schéma.

8. LED WS2812B

- 8.1. Utiliser câble vert 0,1 mm².
- 8.2. Couper 3 fils de 45 cm chacun.
- 8.3. Les passer dans la tige de la fleur avant montage.
- 8.4. Souder sur la LED :
 - VDD
 - DIN
 - VSS
- 8.5. Identifier les fils à la sortie de la base avec un multimètre.
- 8.6. Connecter au terminal block du Veroboard.

9. Assemblage final

- Suivre le guide d'assemblage mécanique de la fleur.

Bibliographie

1. J.S.T. MFG. CO., LTD. XH connector. [en ligne]. 2025. [Consulté le 30 juillet 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.jst-mfg.com/product/index.php?series=277>

Annexe 12

Mécanique et câblage du veroboard

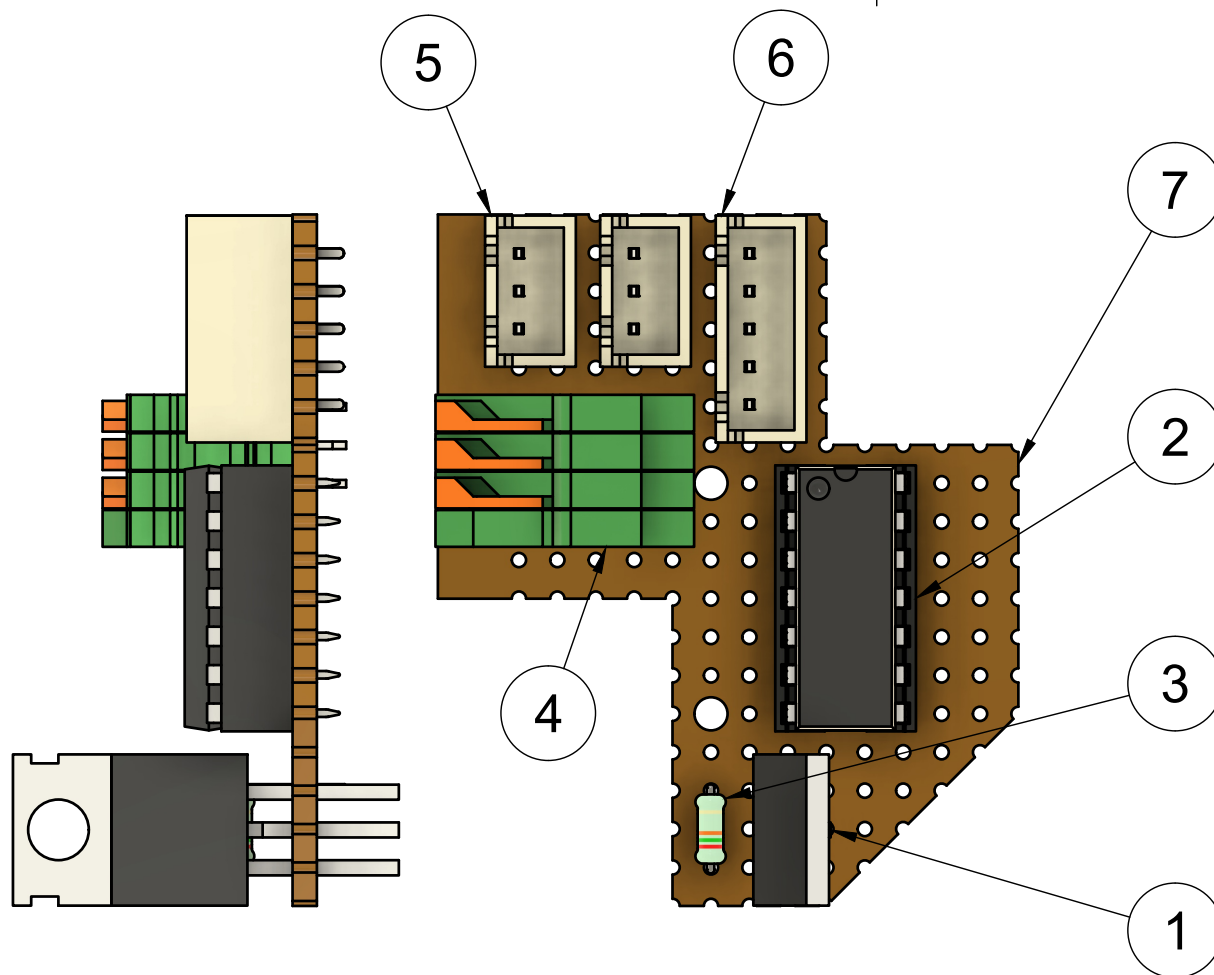
Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Plan du veroboard du prototype final, incluant la liste des composants, le plan mécanique et le schéma de câblage (vue du dessous).

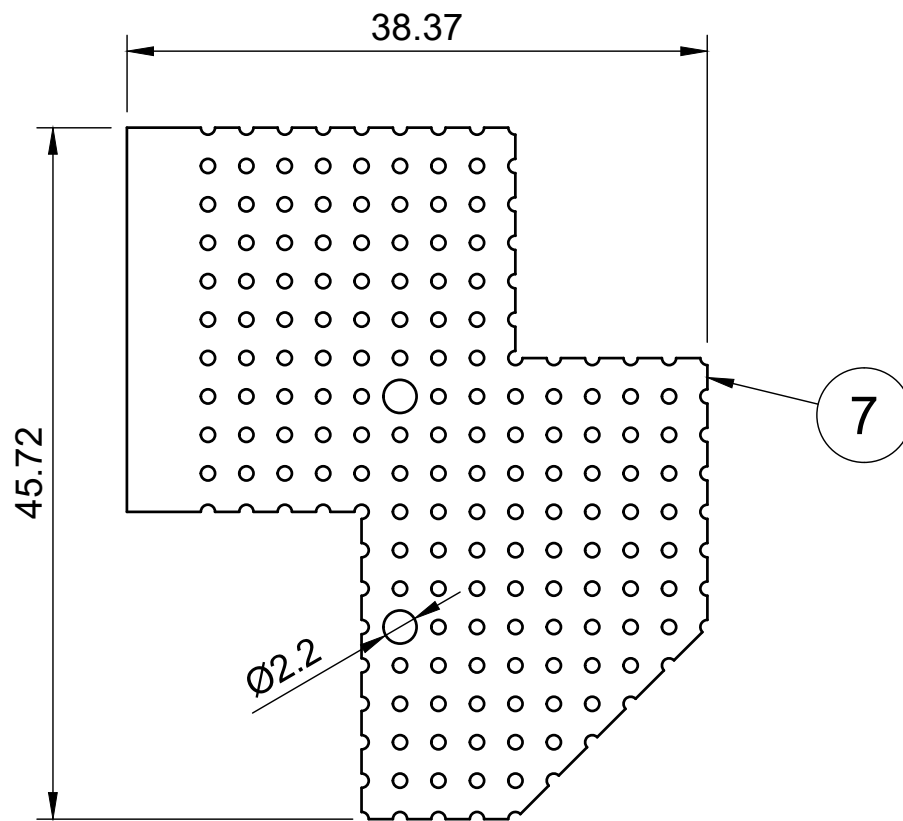
Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 25 juillet 2025



Liste de pièces		
Élément	Quantité	Numéro de pièce
1	1	Transistor IRL540N
2	1	DIP14N socket with IC 74HCT08
3	1	Resistor 15k
4	1	DG141R-3-2.54
5	2	JST-XH3
6	1	JST-XH5
7	1	RadioShack 276-150 stripboard

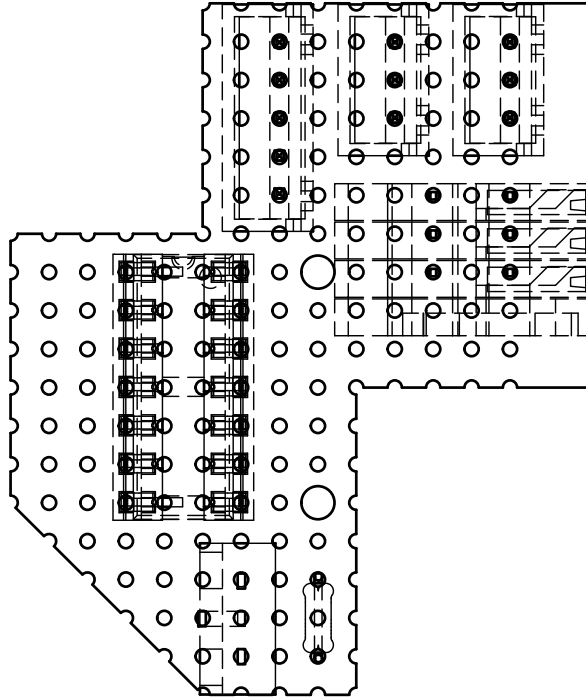
Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 31.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Composants veroboard	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 1/3	



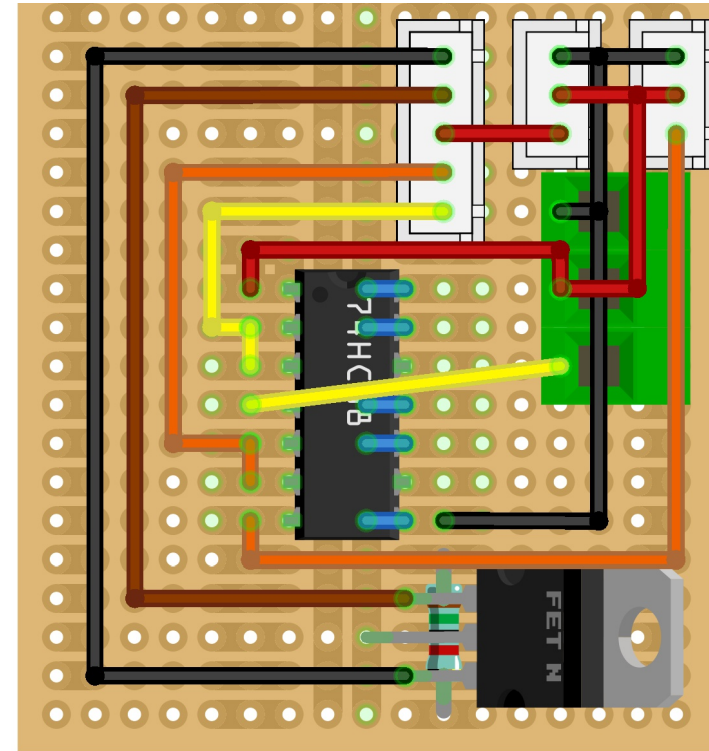
Liste de pièces		
Élément	Quantité	Numéro de pièce
7	1	RadioShack 276-150 stripboard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 31.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Plan mécanique du veroboard	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 2/3

Vue du dessous



Vue du dessous



fritzing

!!! Le plan de câblage fritzing montre la vue du dessous du veroboard
(Les composants sont en réalité de l'autre côté du veroboard)

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 31.07.2025	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Plan de câblage du veroboard	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 3/3

Annexe 13

Guide d'assemblage mécanique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

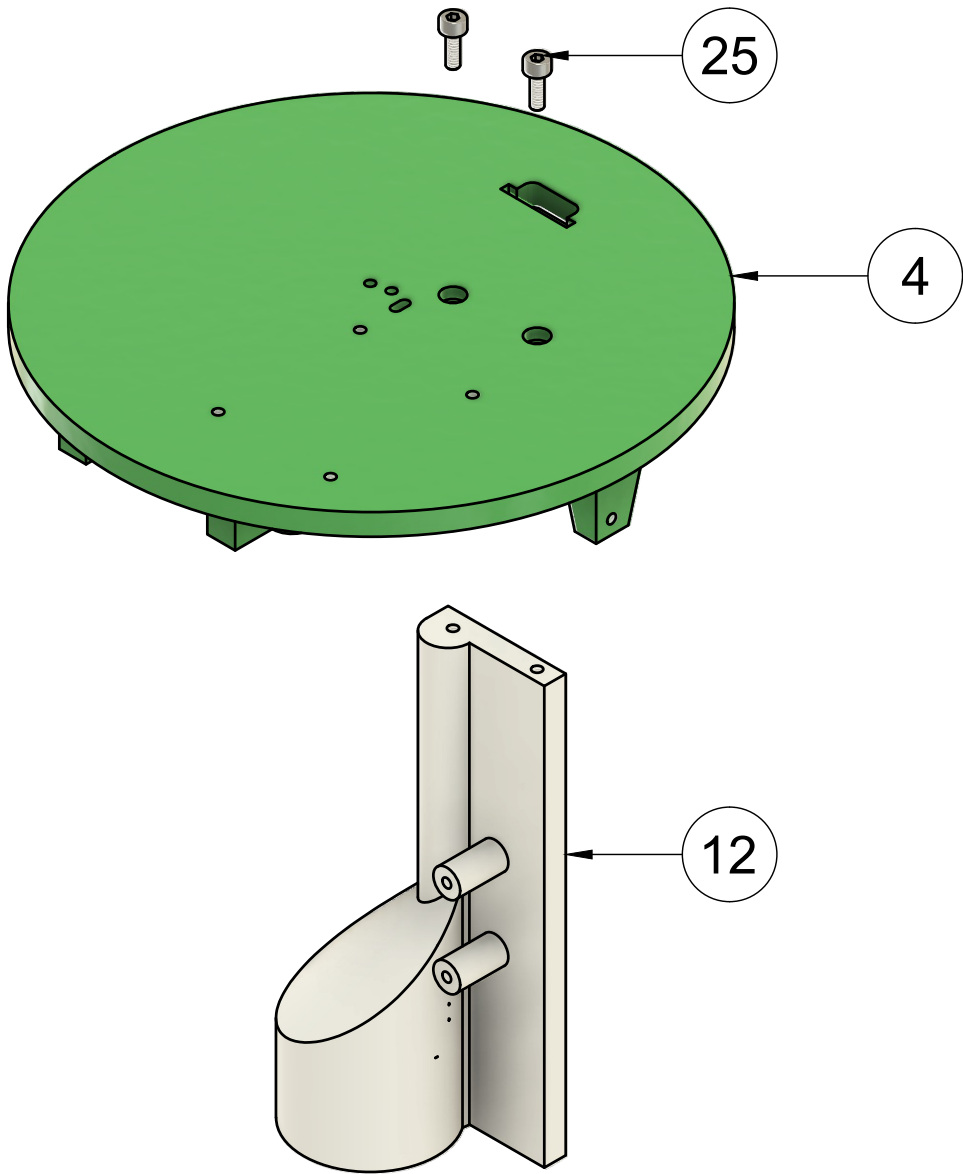
Non confidentiel

Contenu : Guide d'assemblage mécanique de la fleur numérique, présentant pas à pas les opérations nécessaires. Il détaille l'ordre de montage des sous-ensembles, les passages de câbles, les fixations et ajustements à réaliser, ainsi que les instructions spécifiques garantissant la fiabilité mécanique du prototype.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 25 juillet 2025

01 : Assemblage du tronc



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
4	1	Base	----	Plastique
12	1	Support batterie	----	Plastique
25	2	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

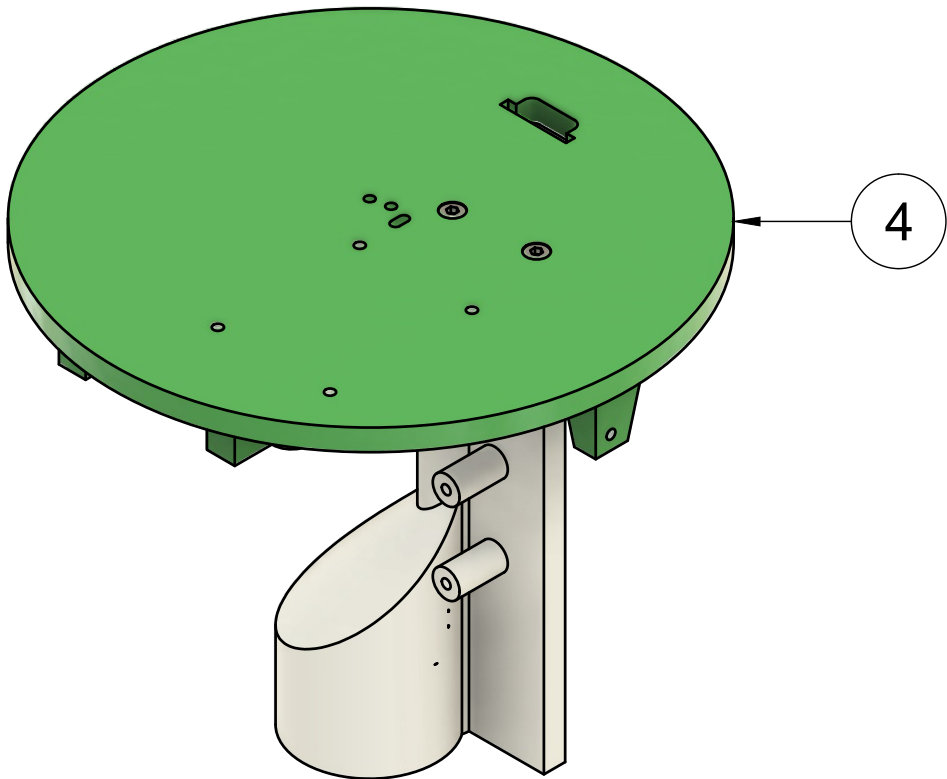
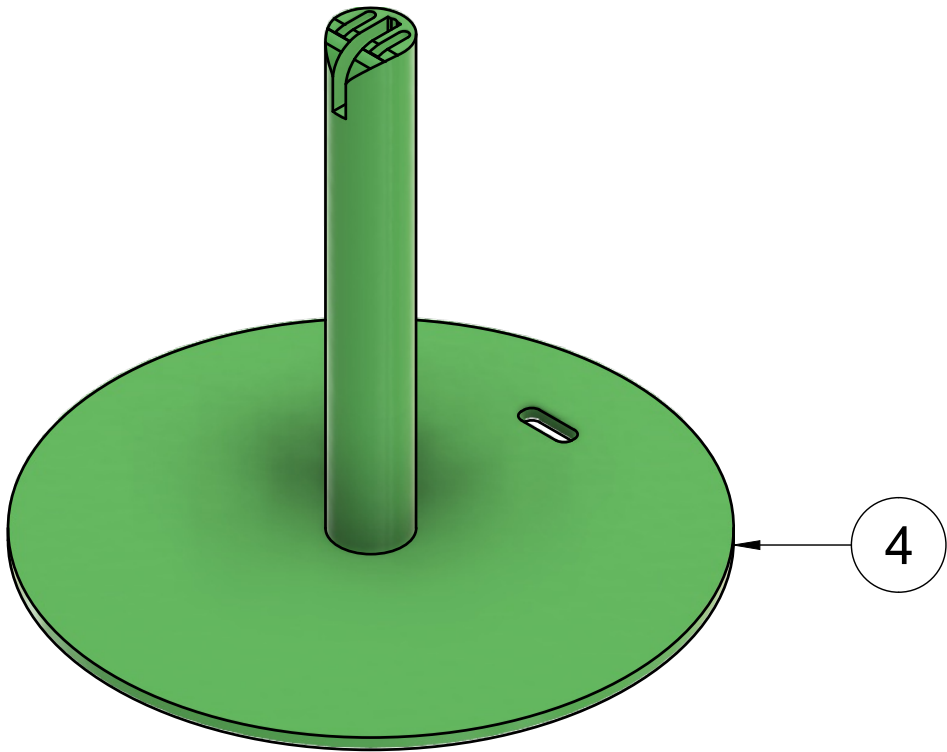
Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet	1/19

02 : Collage de la base

Instructions spécifiques

La base est constituée de deux impressions 3D. Il faut les coller entre elles à l'aide d'une colle adaptée, telle que l'Araldite CRYSTAL (bi-composant).

Une attention particulière doit être portée à l'alignement des deux pièces lors du collage. De plus, il est déconseillé d'appliquer de la colle au niveau des filetages et des trous. Veiller à laisser une marge de sécurité lors de l'application de la colle.



Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
1	1	Base pot	----	Plastique
2	1	Base tige	----	Plastique

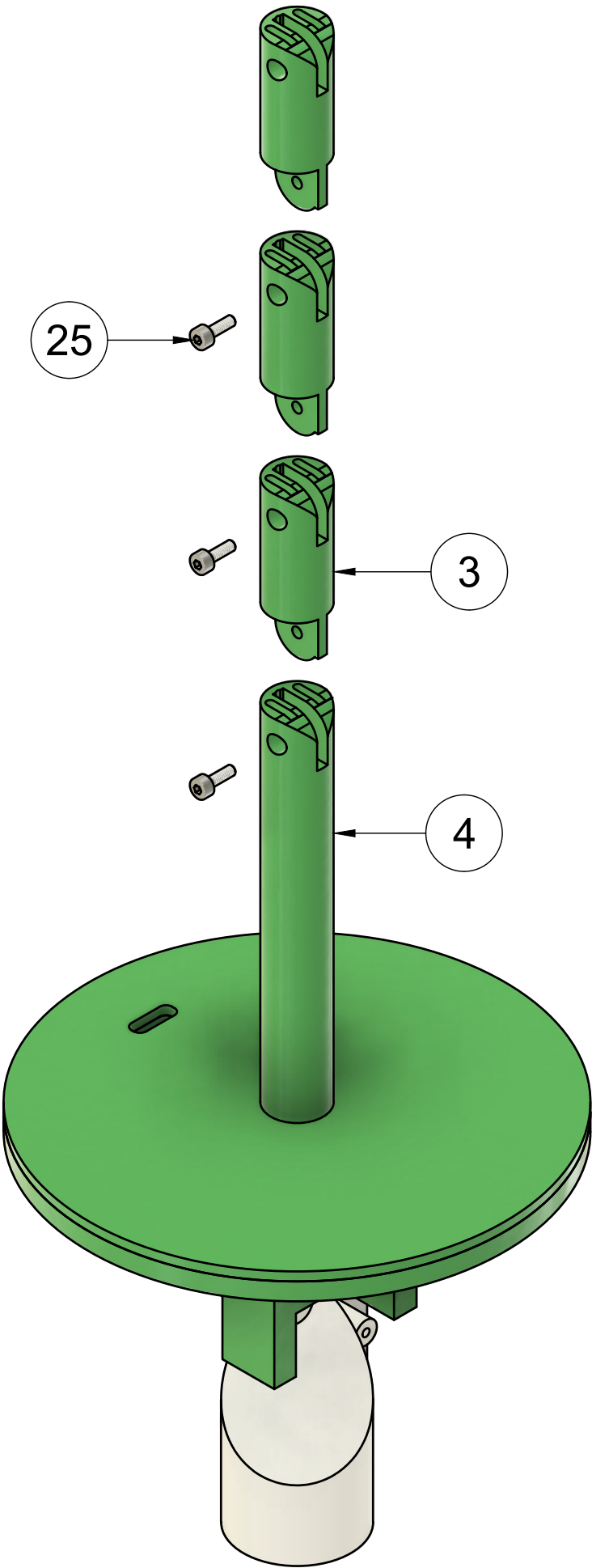
Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 2/19	

03 : Assemblage de la tige

Instructions spécifiques

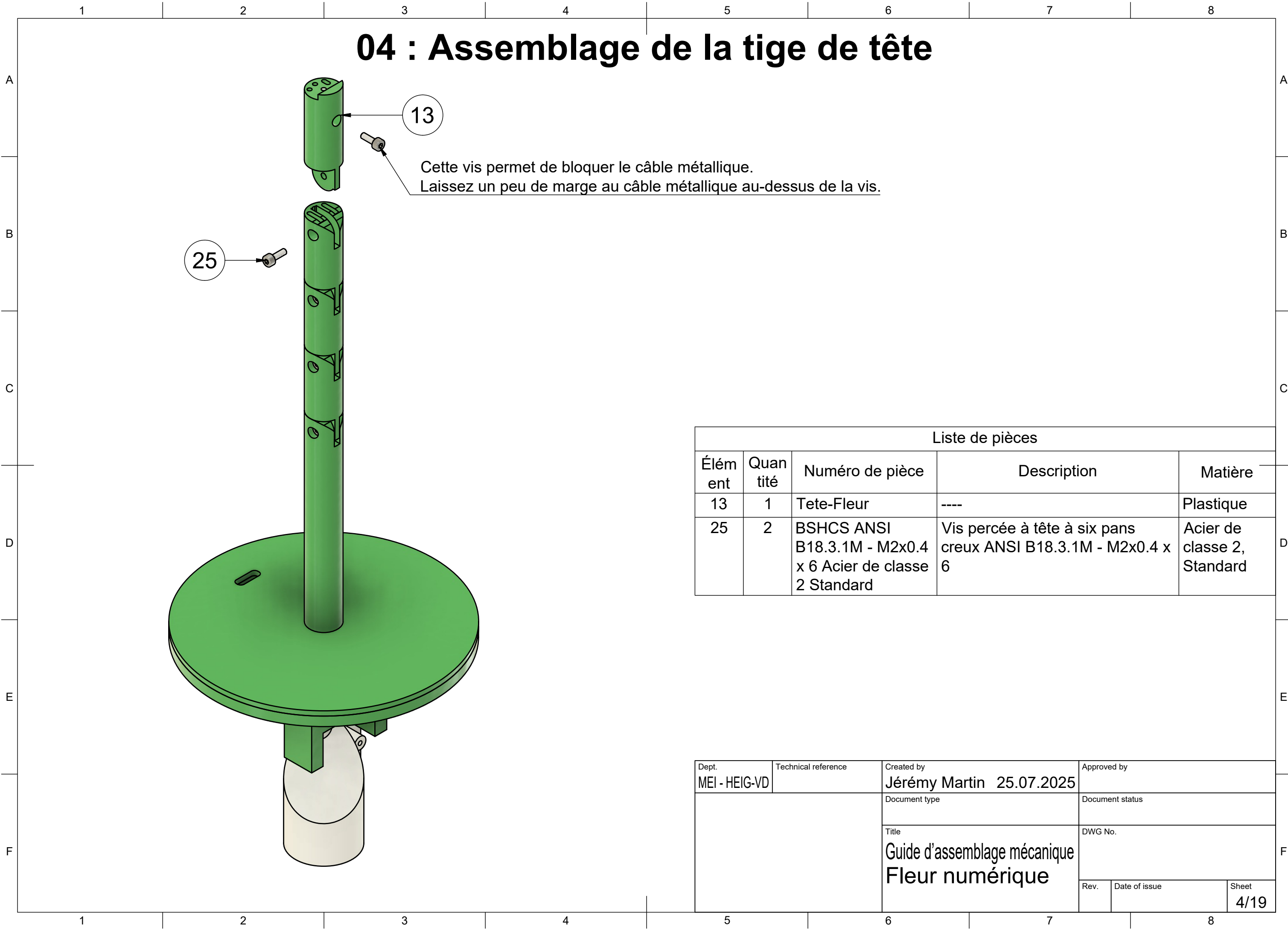
Lors de l'assemblage de la tige, il est important de faire passer les éléments suivants à travers chaque partie de la tige :

- les 3 câbles d'alimentation et de contrôle de la LED
- le câble métallique servant à tendre mécaniquement la fleur

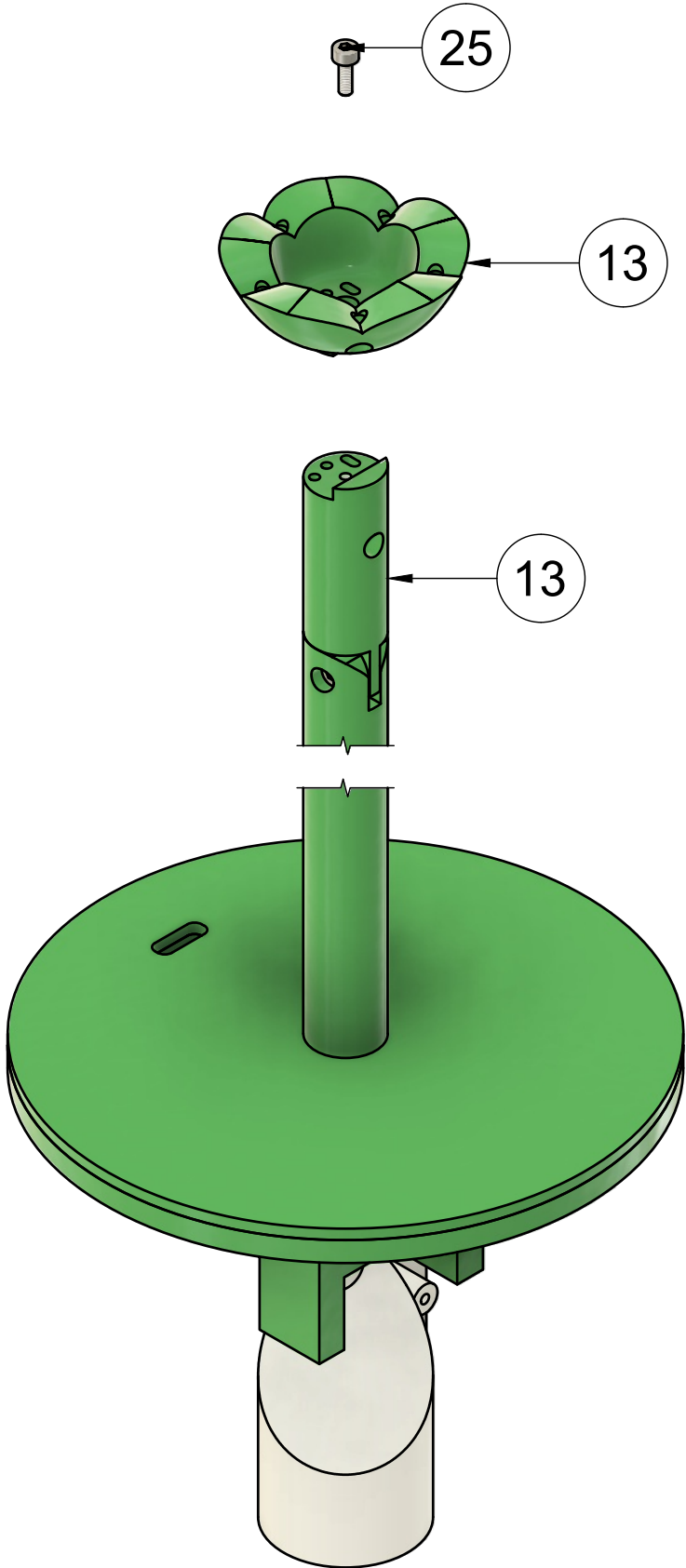


Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
3	3	Tige-Articulation	----	Plastique
4	1	Base	----	Plastique
25	3	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 3/19	



05 : Assemblage de la tête



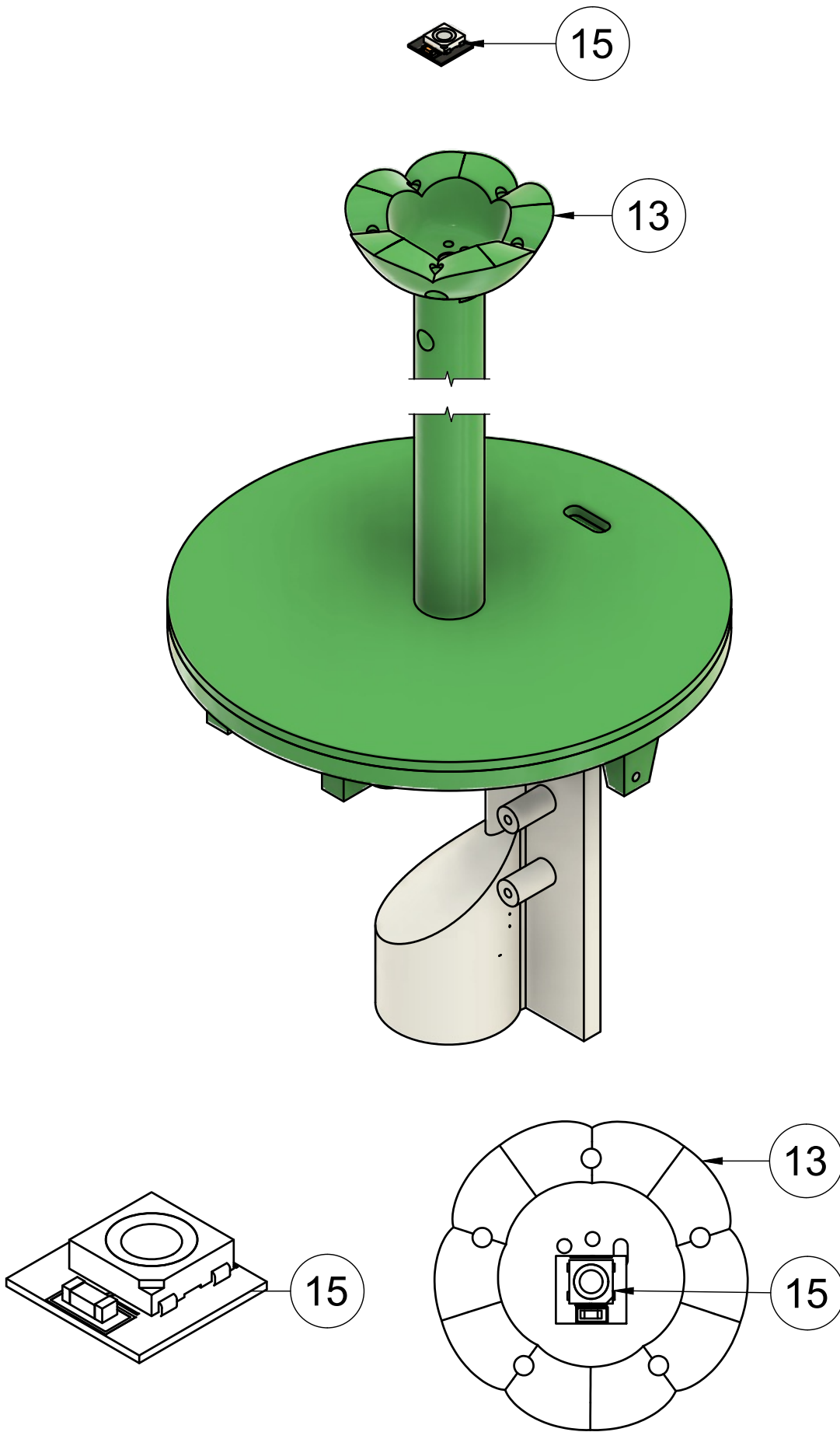
Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
13	1	Tete-Fleur	----	Plastique
25	1	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 5/19	

06 : Assemblage de la LED

Instructions spécifiques

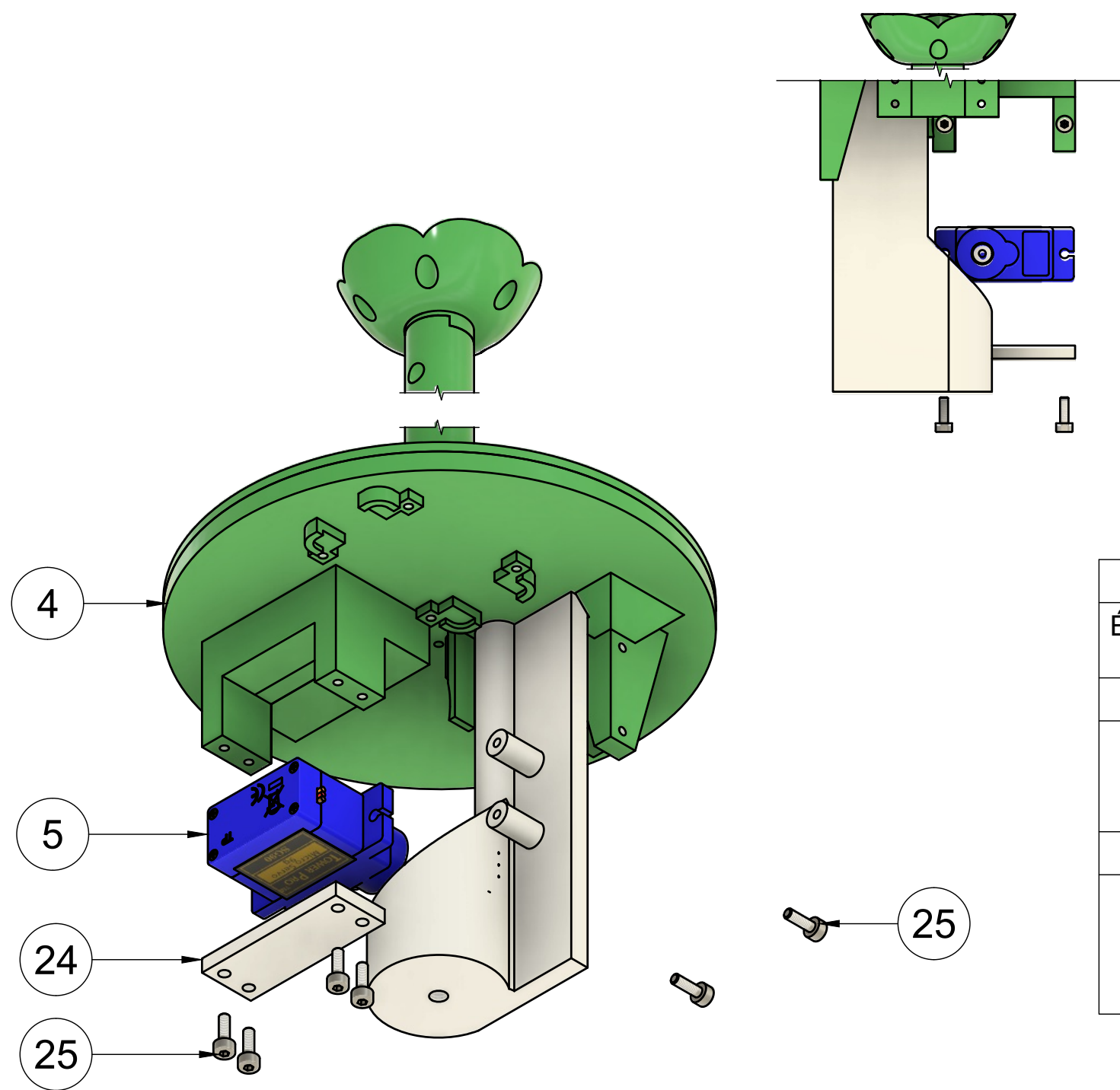
Voir les instructions électriques concernant les soudures.



Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
13	1	Tete-Fleur	----	Plastique
15	1	WS2812B Black 60leds/m	----	----

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 6/19

07 : Assemblage du servo moteur



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
4	1	Base	----	Plastique
5	1	SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro.1_Peña	----	Acier
24	1	Attache servo	----	Plastique
25	6	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

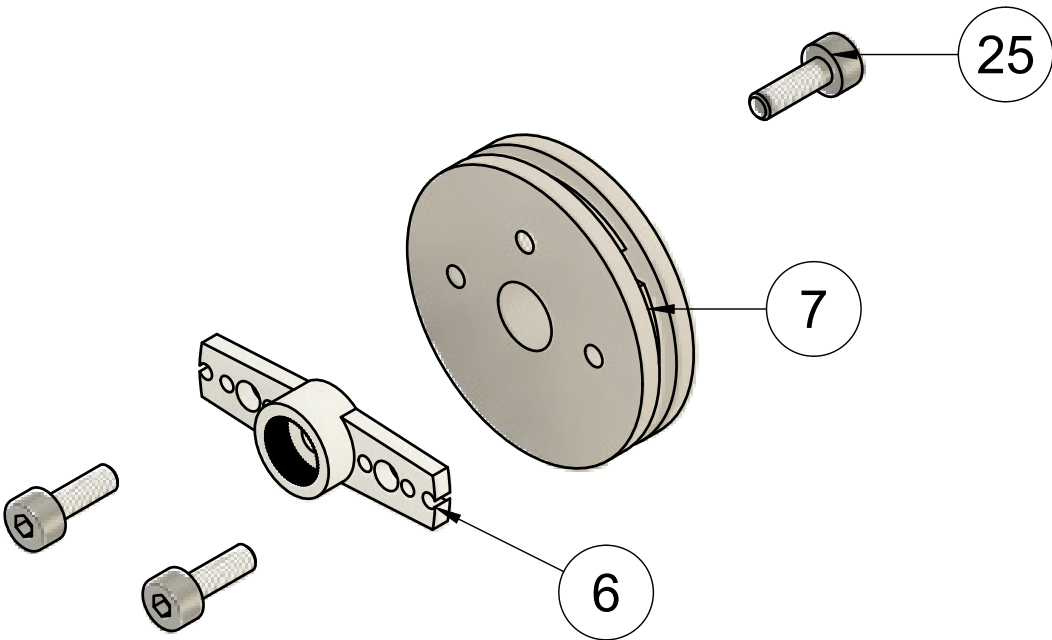
Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 7/19

08 : Assemblage de la roue

Instructions spécifiques

Lors de l'assemblage de la tige, il est important de faire passer les éléments suivants à travers chaque partie de la tige :

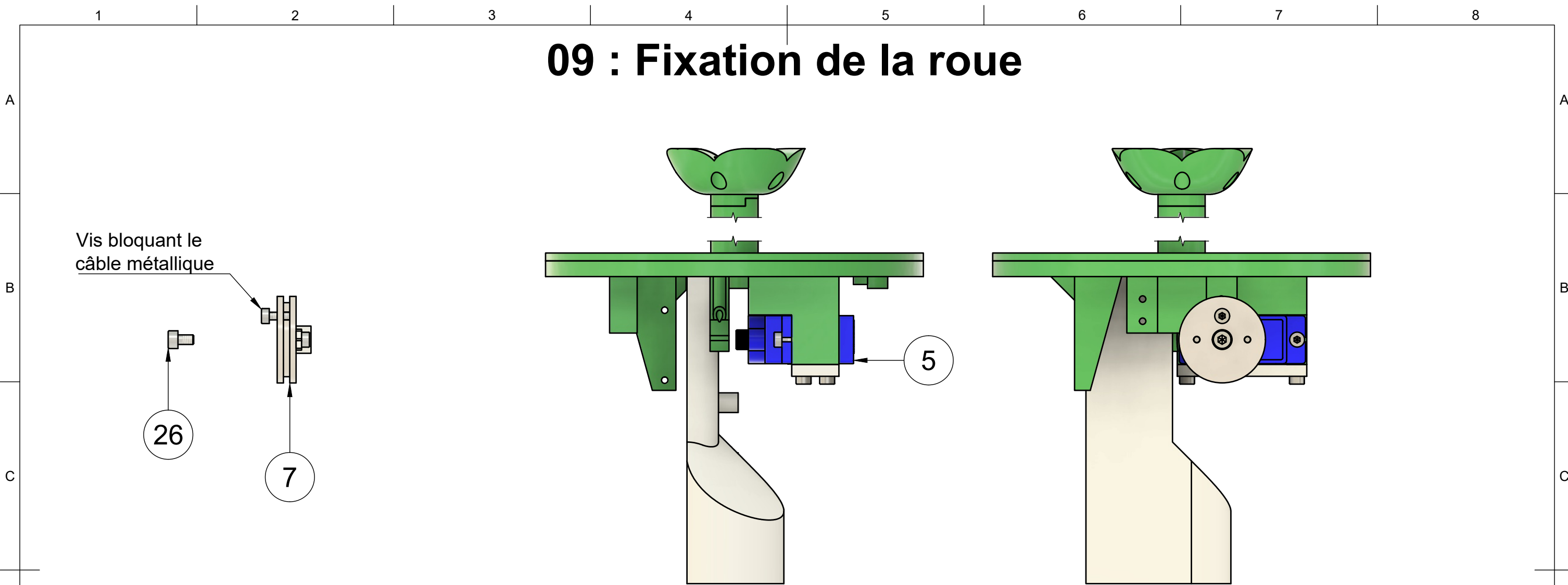
- les 3 câbles d'alimentation et de contrôle de la LED
- le câble métallique servant à tendre mécaniquement la fleur



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
6	1	SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro.3_Pe a	----	Plastique
7	1	Roue-Cable	----	Plastique
25	3	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 8/19	

09 : Fixation de la roue



Instructions spécifiques

!!! ATTENTION À LA TENSION DU CÂBLE MÉTALLIQUE !!!

Si vous tendez le câble lorsque la fleur est en position droite, le moteur pourrait, une fois alimenté, exercer une tension supplémentaire. Cela risque de créer une contrainte mécanique excessive sur les pièces 3D de la tige, même si celles-ci ne devraient pas se casser.

Procédure recommandée :

- 1. Vous pouvez déjà insérer et tendre légèrement le câble, puis le bloquer temporairement.
- 2. Avant la mise en marche, déconnectez la roue du moteur.
- 3. Alimentez le système pour que le moteur atteigne sa position de tension maximale définie par le programme.
- 4. Reconnectez ensuite la roue, de manière à ce que cette position maximale corresponde à la tension maximale souhaitée pour la tige.

Cette méthode garantit que la position maximale du moteur est alignée avec la tension mécanique maximale supportée par la structure.

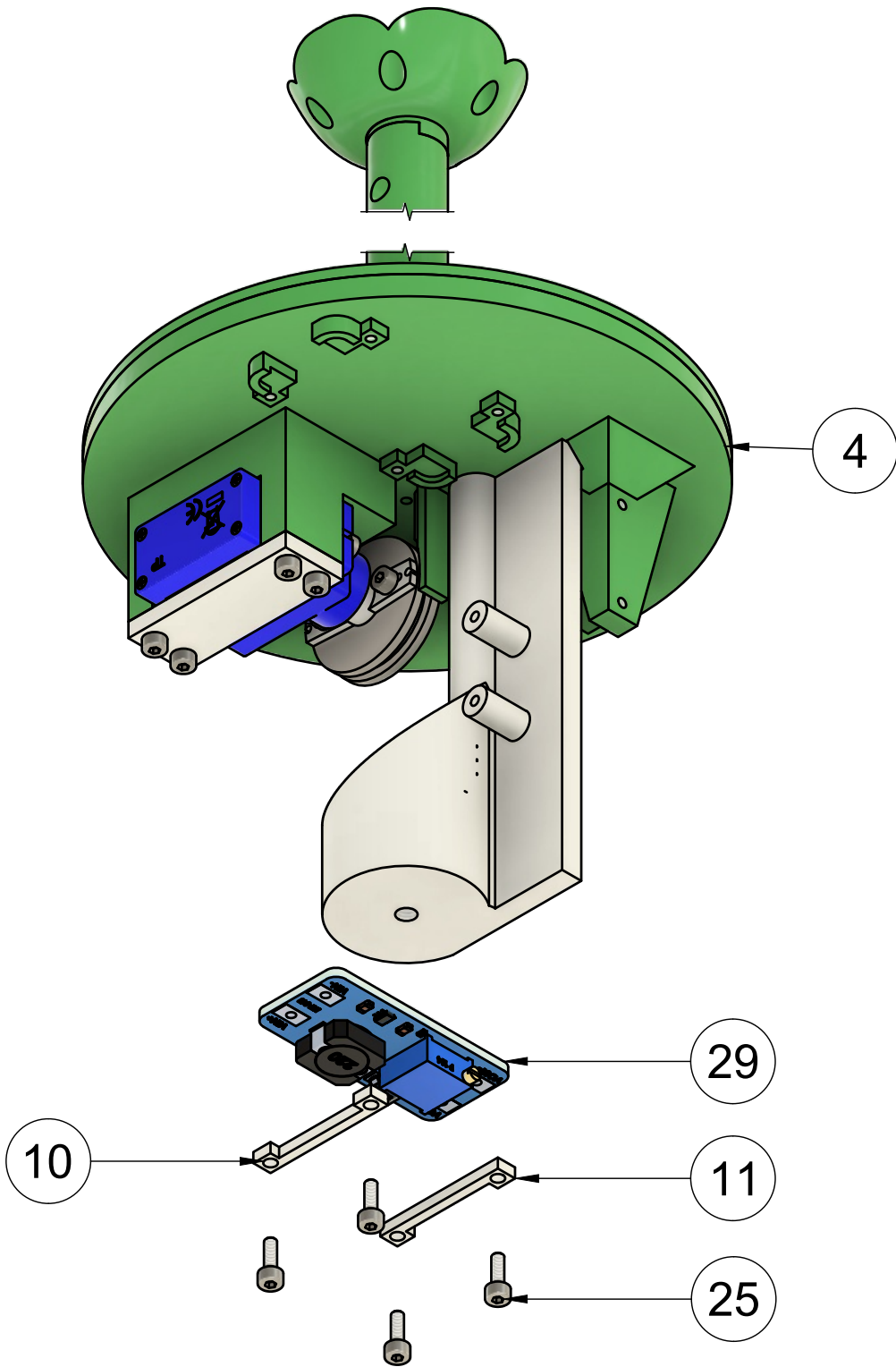
Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
6	1	SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro.3_Pe a	----	Plastique
7	1	Roue-Cable	----	Plastique
26	1	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2.5x0.45 x 4 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2.5x0.45 x 4	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 9/19

10 : Assemblage du MT3608

Instructions spécifiques

- Souder les câbles avant assemblage.



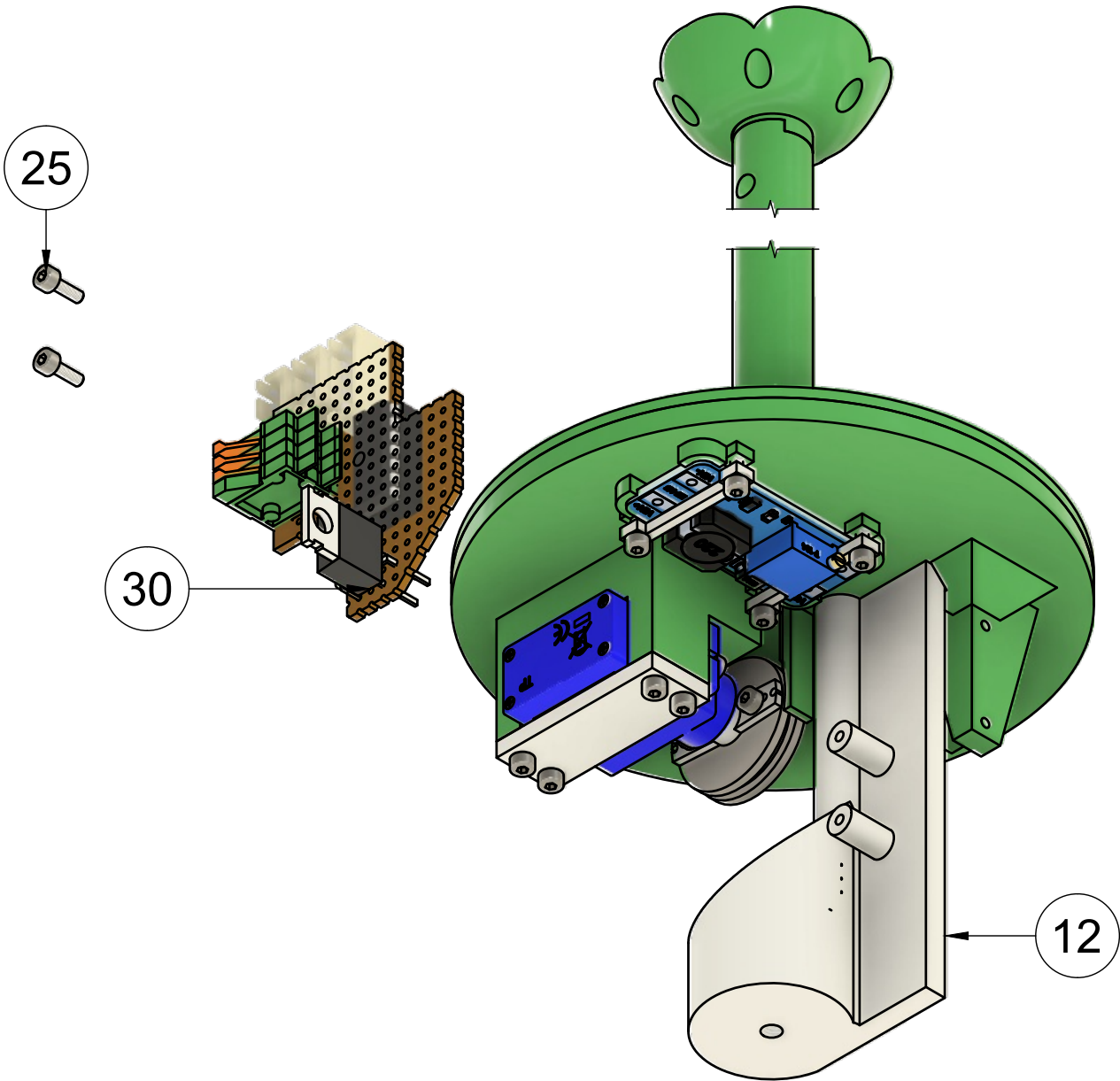
Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
4	1	Base	----	Plastique
10	1	Attache 1 MT3608	----	Plastique
11	1	Attache 2 MT3608	----	Plastique
25	4	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard
29	1	MT3608 Converter	STEP AP214	Acier

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 10/19	

11 : Assemblage du veroboard

Instructions spécifiques

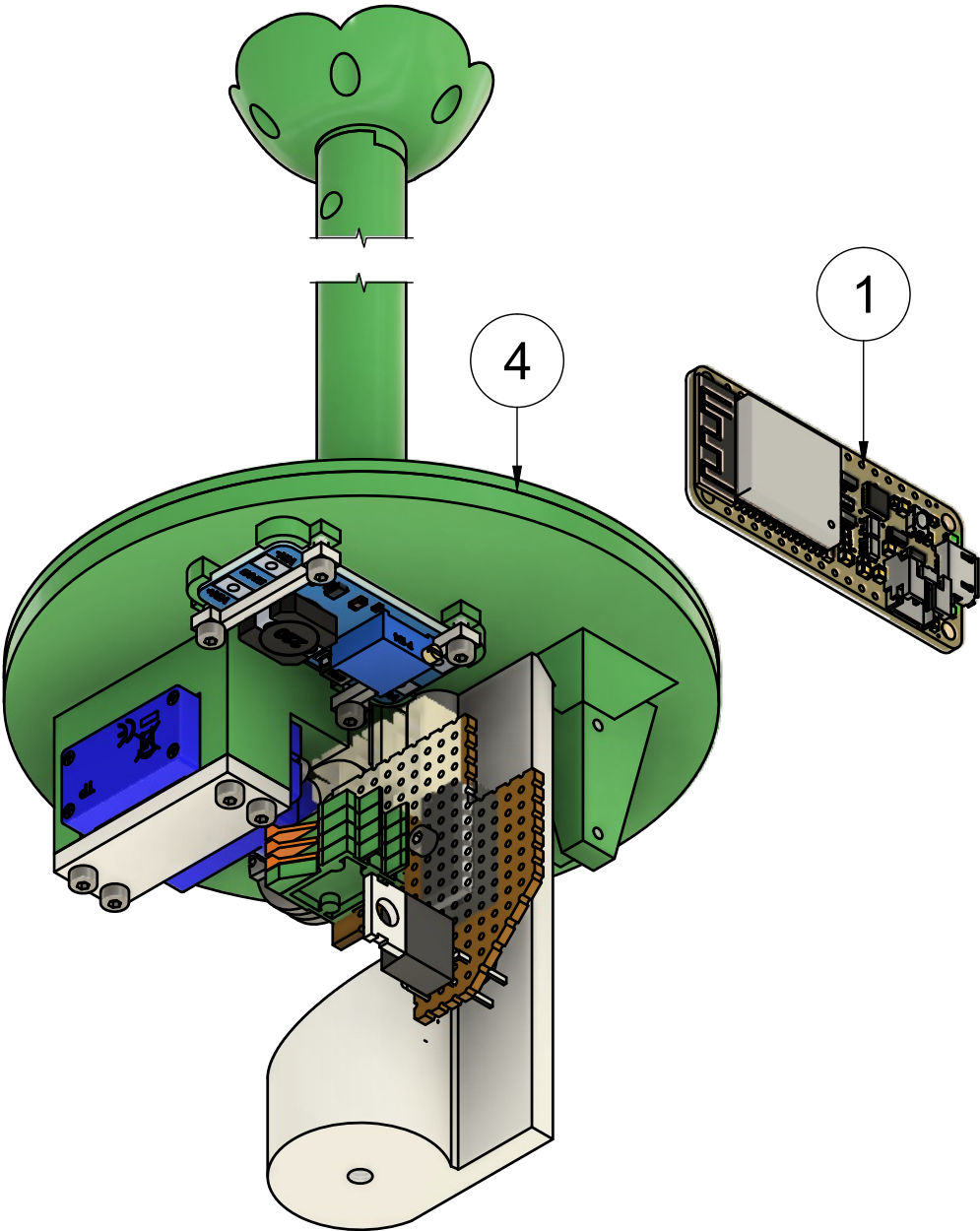
- Concernant le veroboard, veuillez vous référer au schéma électrique correspondant.



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
12	1	Support batterie	----	Plastique
25	2	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard
30	1	Veroboard	Circuit ayant 3 tâches. Premièrement, boost 5VDC des signaux de commandes de l'ESP32. Deuxièmement, commande de l'alimentation de la LED et du servo moteur. Troisièmement, interface de connexion des différents composants externes.	----

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 11/19

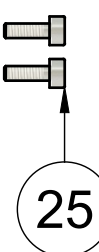
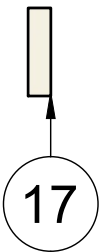
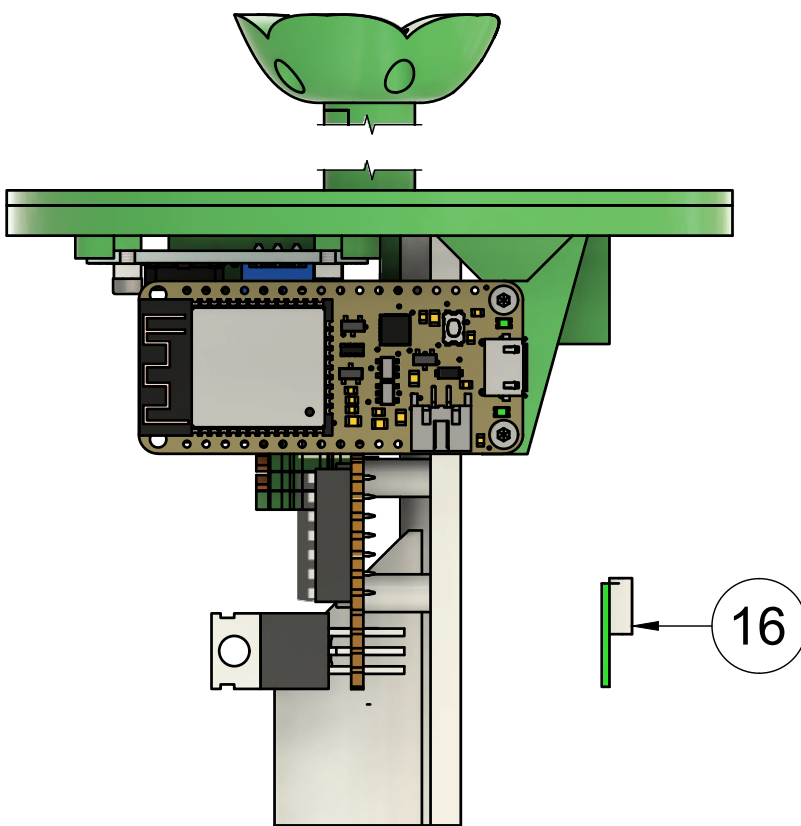
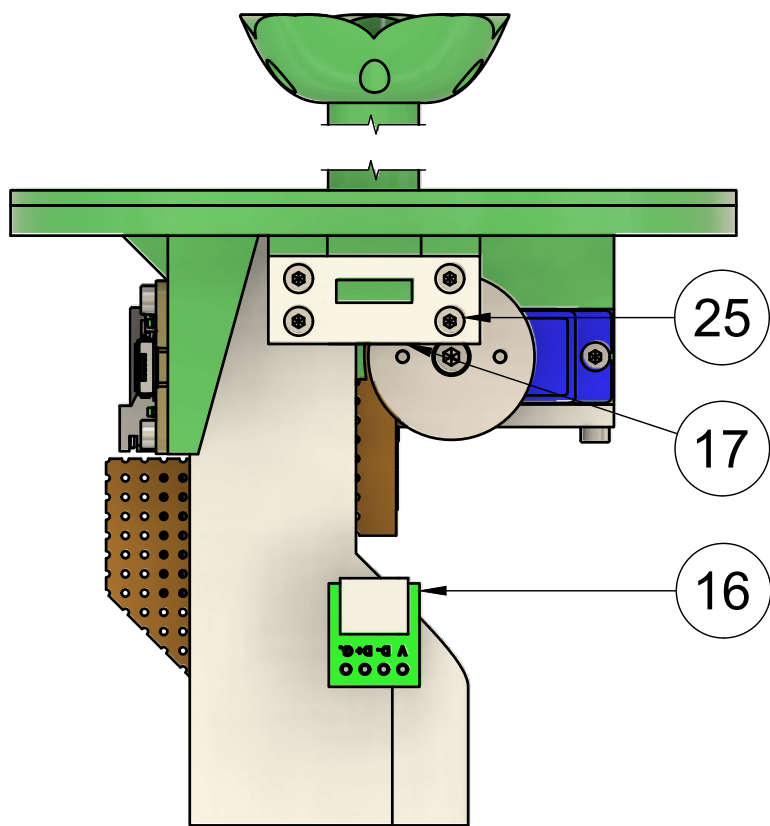
12 : Assemblage de l'ESP32



Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
1	1	3405 Adafruit HUZZAH32 ESP32 Feather	----	----
4	1	Base	----	Plastique
25	2	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 12/19

13 : Assemblage de la roue



Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
16	1	USB-C connector	STEP AP214	Acier
17	1	Attache Connecteur Type C	----	Plastique
25	4	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Instructions spécifiques

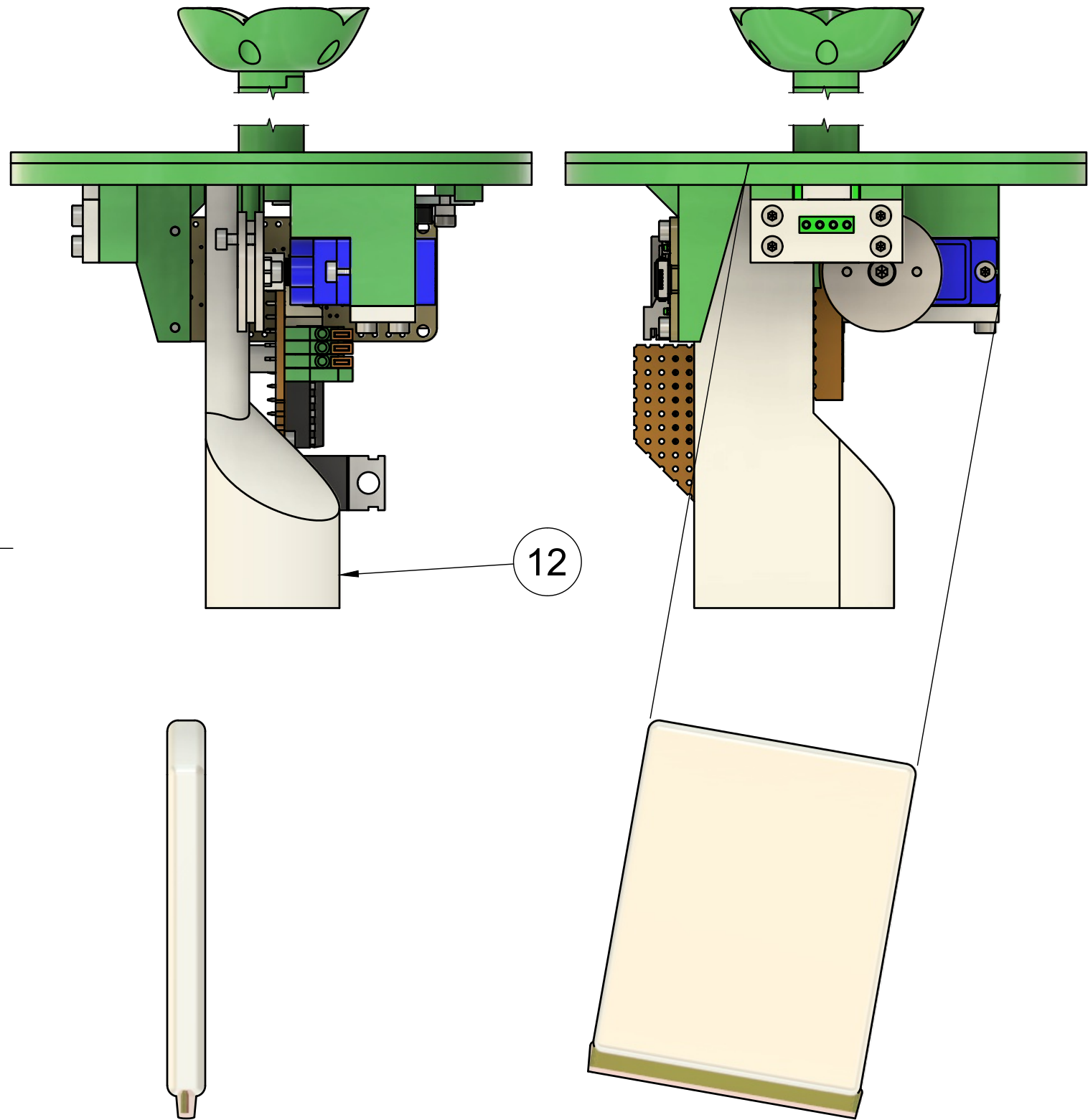
Les câbles doivent être passés à travers l'ouverture du support (17) avant de souder les connecteurs USB Type-C femelle et Micro-USB mâle.

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 13/19

14 : Fixation de la batterie

Instructions spécifiques

Un adhésif double face doit être appliqué sur le support pour maintenir la batterie en place.
La batterie sera légèrement inclinée, en raison de l'espace disponible dans le pot.



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
9	1	LiPo Battery v5	----	Acier
12	1	Support batterie	----	Plastique

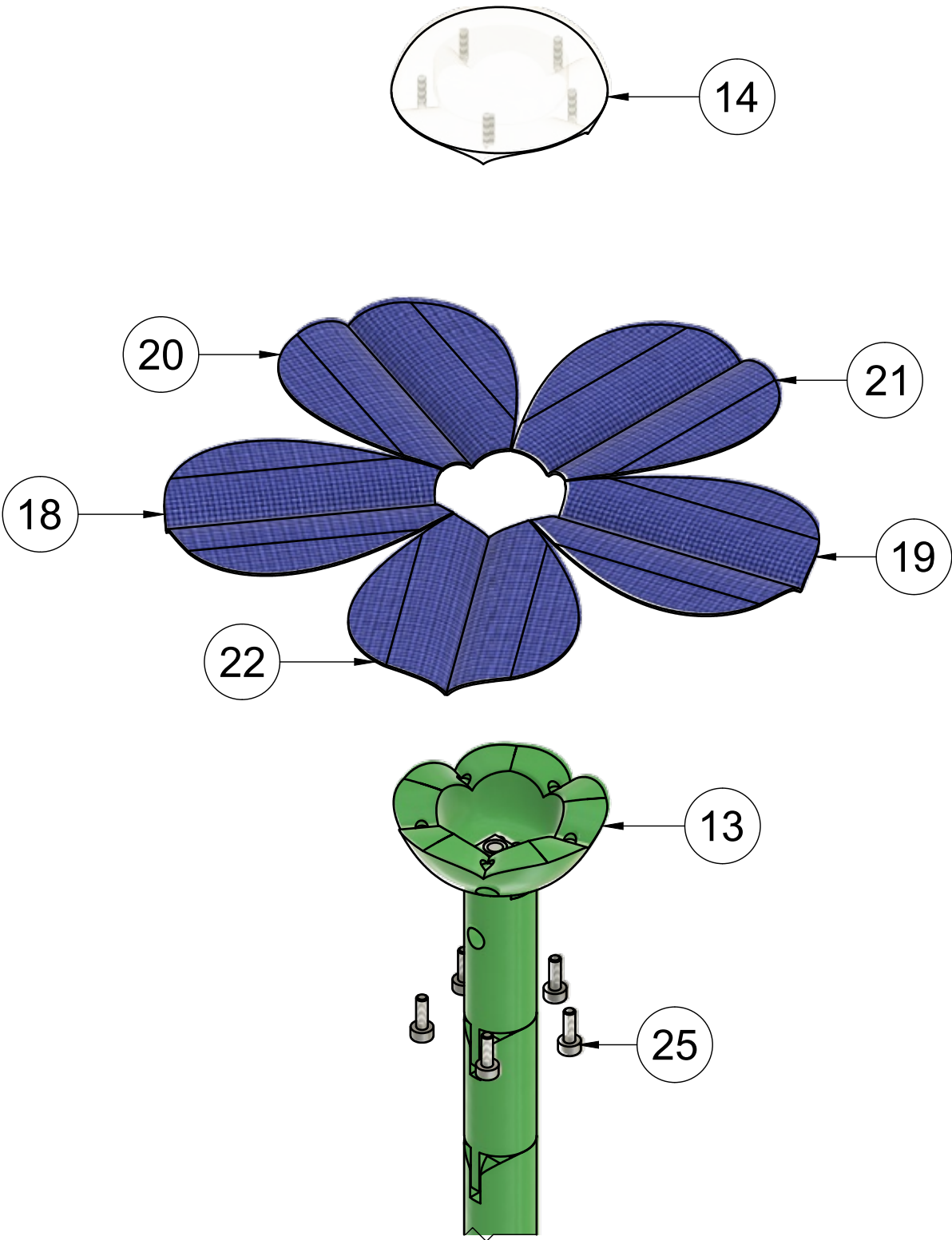
Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 14/19	

15 : Assemblage de la fleur

Instructions spécifiques

Un plan de découpe pour les pétales est à disposition.
N'oubliez pas de percer les trous nécessaires au passage des vis.

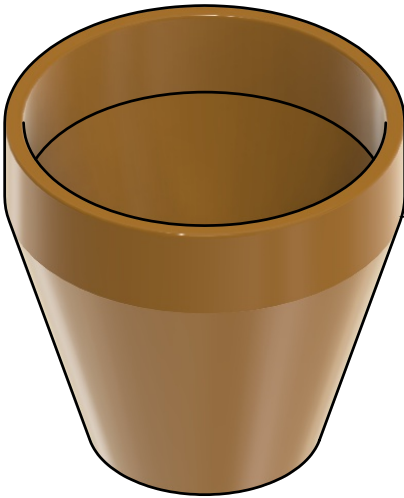
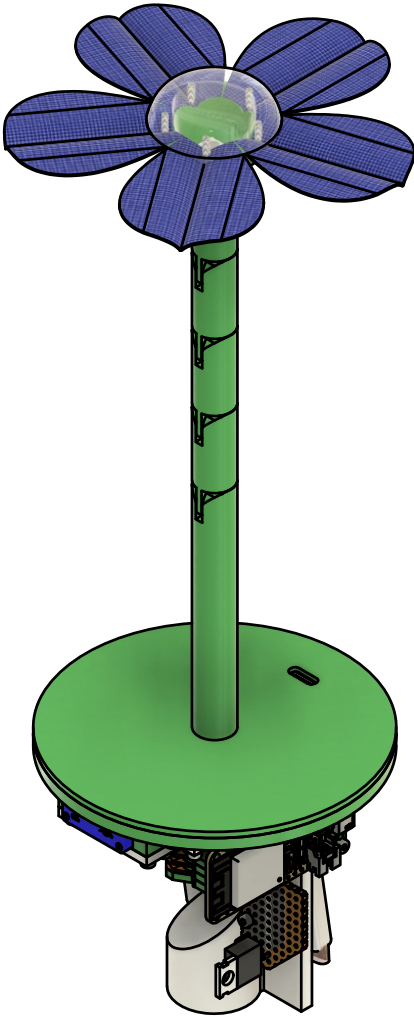
Tous les pétales sont identiques.



Liste de pièces				
Élém ent	Quan tité	Numéro de pièce	Description	Matière
13	1	Tete-Fleur	----	Plastique
14	1	Capitule	----	----
18	1	Petale (5)	Feutrine, 100% Polyester, épaisseur 2mm	Tissu
19	1	Petale (1)	Feutrine, 100% Polyester, épaisseur 2mm	Tissu
20	1	Petale (2)	Feutrine, 100% Polyester, épaisseur 2mm	Tissu
21	1	Petale (3)	Feutrine, 100% Polyester, épaisseur 2mm	Tissu
22	1	Petale (4)	Feutrine, 100% Polyester, épaisseur 2mm	Tissu
25	5	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête à six pans creux ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 15/19	

16 : Empottage

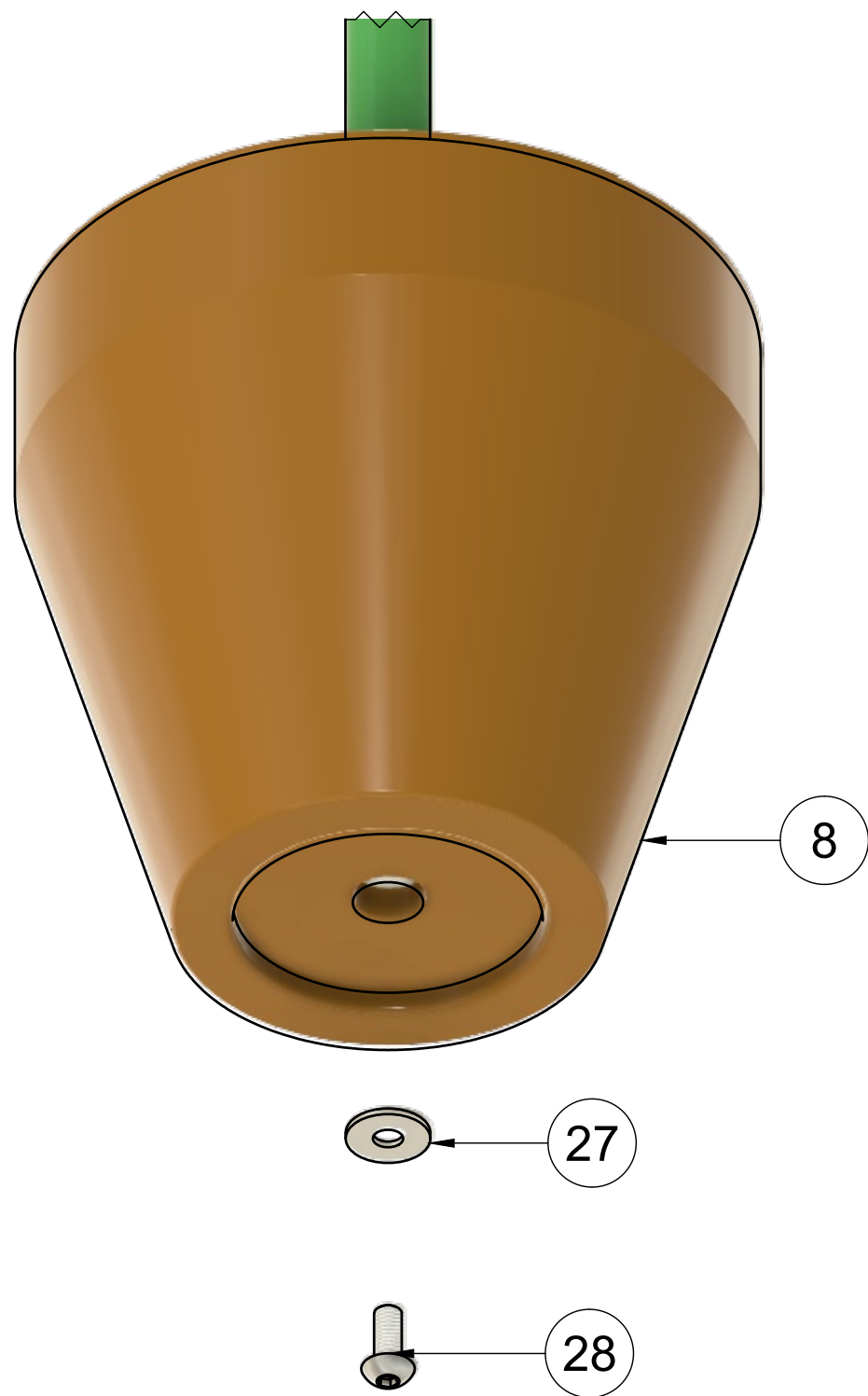


8

Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
8	1	Pot	Deroma Pot en Terre Cuite Rouge Standard 11 × 10 cm	Porcelaine

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 16/19

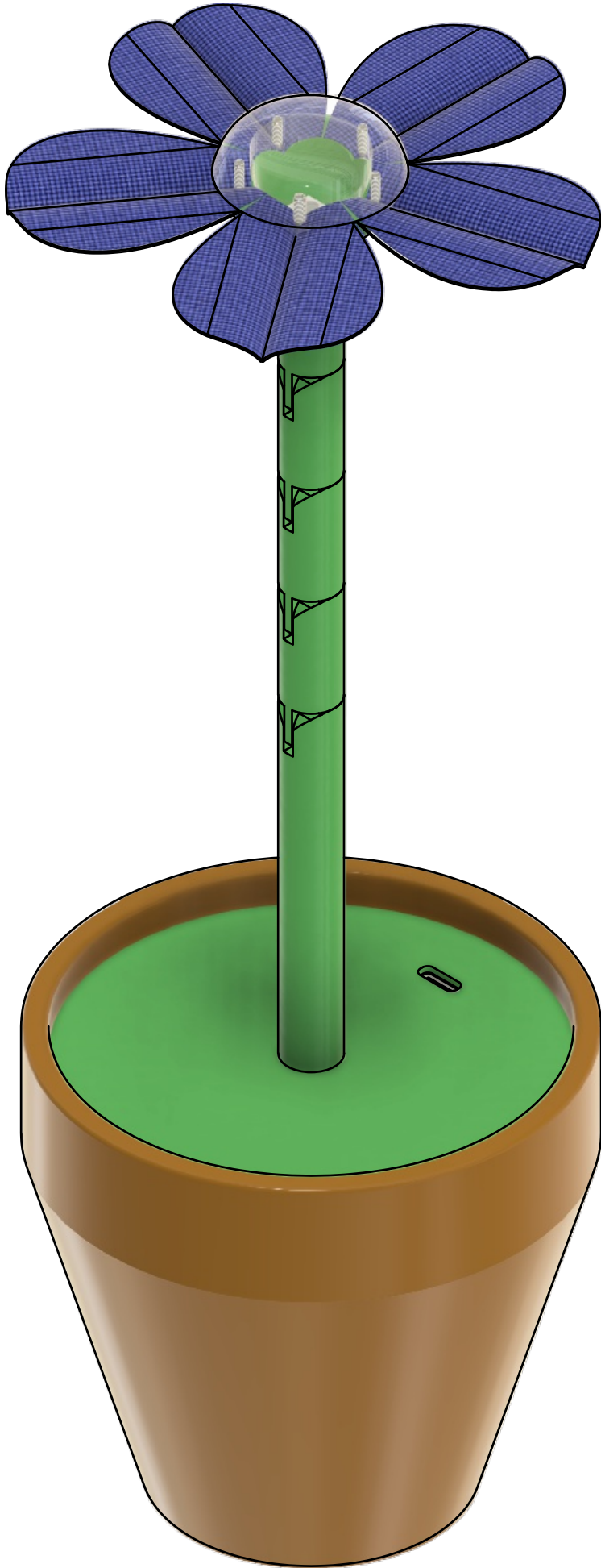
17 : Fixation du pot



Liste de pièces				
Élément	Quantité	Numéro de pièce	Description	Matière
8	1	Pot	Deroma Pot en Terre Cuite Rouge Standard 11 × 10 cm	Porcelaine
12	1	Support batterie	----	Plastique
27	1	DIN 9021 - 4.3 Acier 100 HV Standard	Rondelle DIN 9021 - 4.3	Acier 100 HV, Standard
28	1	BHSBHCS ASME B18.3.4M - M4 x 0.7 x 10 Acier de classe 2 Standard	Vis percée à tête bombée à six pans creux ASME B18.3.4M - M4 x 0.7 x 10	Acier de classe 2, Standard

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 17/19	

18 : Finale



Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Guide d'assemblage mécanique Fleur numérique	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 18/19

19 : Liste des composants

Liste de composants				Liste de composants			
Éléme nt	Quan tité	Numéro de pièce	Matière	Éléme nt	Quan tité	Numéro de pièce	Matière
1	1	3405 Adafruit HUZZAH32 ESP32 Feather	----	18	1	Petale (5)	Tissu
				19	1	Petale (1)	Tissu
				20	1	Petale (2)	Tissu
2	1	Tige-Articulation Test	Acier	21	1	Petale (3)	Tissu
3	3	Tige-Articulation	Plastique	22	1	Petale (4)	Tissu
4	1	Base	Plastique	23	1	Support	Plastique
5	1	SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro.1_Pe a	Acier	24	1	Attache servo	Plastique
				25	34	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2x0.4 x 6 Acier de classe 2 Standard	Acier de classe 2, Standard
6	1	SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro.3_Pe a	Plastique	26	1	BSHCS ANSI B18.3.1M - M2.5x0.45 x 4 Acier de classe 2 Standard	Acier de classe 2, Standard
7	1	Roue-Cable	Plastique				
8	1	Pot	Porcelaine				
9	1	LiPo Battery v5	Acier				
10	1	Attache 1 MT3608	Plastique	27	1	DIN 9021 - 4.3 Acier 100 HV Standard	Acier 100 HV, Standard
11	1	Attache 2 MT3608	Plastique				
12	1	Support batterie	Plastique	28	1	BHSBHCS ASME B18.3.4M - M4 x 0.7 x 10 Acier de classe 2 Standard	Acier de classe 2, Standard
13	1	Tete-Fleur	Plastique				
14	1	Capitule	----				
15	1	WS2812B Black 60leds/m	----	29	1	MT3608 Converter	Acier
16	1	USB-C connector	Acier	30	1	Veroboard	----
17	1	Attache Connecteur Type C	Plastique				

Dept. MEI - HEIG-VD	Technical reference	Created by Jérémy Martin 25.07.2025	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Liste composants mécaniques Fleur numérique	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
			Sheet 19/19	

Annexe 14

Programme ESP32 de la Fleur numérique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Programme embarqué sur ESP32 gérant la communication WebSocket JSON avec un serveur, le contrôle du servo et de la LED RGB, ainsi que la gestion de l'énergie via MOSFET et Deep Sleep. Le code est structuré en modules (Wi-Fi, WebSocket, servo, LED, alimentation) et documenté avec Doxygen.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

Annexe 15

Serveur WebSocket de test

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Serveur Node.js WebSocket (port 8080) avec interface web HTML/CSS/JS permettant d'envoyer en temps réel à la fleur des commandes de LED, de santé et de mise en veille. Utilisé pour la mise au point et le contrôle manuel des fonctions de la fleur.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

Annexe 16

Serveur de simulation temps réel

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Backend Node.js qui lit dans une base SQLite des mesures réseau réelles collectées dans le passé (projet CarbonViz Home). Ces données sont rejouées en direct, en respectant leur chronologie originale, afin de simuler un flux temps réel comme si la scène se déroulait à ce moment-là. Le serveur calcule à partir de ces valeurs la consommation instantanée et cumulée, détermine l'état visuel de la fleur (LED, santé, veille) et l'envoie à l'ESP32 via WebSocket.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

Annexe 17

Simulateur d'usage de la fleur numérique

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Note : Cette annexe est disponible uniquement en version numérique. Elle peut être consultée sur la clé USB jointe au Travail de Bachelor.

Contenu : Application Vue.js utilisée lors des tests utilisateurs pour simuler l'utilisation de la fleur numérique sur une semaine complète, jour par jour. Chaque action de consommation numérique (ex. streaming, réseaux sociaux, visioconférence) influe sur la consommation cumulée et met à jour en temps réel l'état visuel de la fleur (LED et inclinaison), en mode simulation locale ou via WebSocket vers l'ESP32. L'outil permet d'évaluer la compréhension et l'impact des signaux visuels sur plusieurs jours simulés.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 30 juillet 2025

Annexe 18

Rapport de test : Prototype fonctionnel

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Ce document présente le rapport complet du test utilisateur du prototype fonctionnel, comprenant la méthodologie employée, l'analyse quantitative et qualitative des résultats, l'identification des problèmes UX majeurs ainsi que les recommandations concrètes pour améliorer le dispositif.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 1 août 2025

I. Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

II. Table des matières

1. Introduction	5
1.1. Contexte du test.....	5
1.2. Objectifs du test.....	5
1.3. Hypothèses UX.....	6
2. Méthodologie.....	6
2.1.1. Matériel utilisé	7
2.1.2. Plan.....	7
2.2. Scénarios de test et tâches	8
2.2.1. Tâche 2 – Simulation d’une semaine d’utilisation	9
3. Profil des participants	11
3.1. Critères de sélection	11
3.1.1. Critères d’exclusion	11
3.2. Profils effectifs des participants.....	11
3.2.1. Sensibilité environnementale, attentes initiales et rapport aux objets interactifs ..	13
3.2.2. Tendances issues du questionnaire pré-test	14
4. Résultats.....	14
4.1. Quantitatifs	14
4.1.1. Single Ease Question (SEQ)	14
4.1.2. System Usability Scale (SUS)	16
4.1.3. User Experience Questionnaire (UEQ)	16
4.2. Qualitatifs.....	19

4.2.1.	Tâche 1 : Première interaction spontanée.....	19
4.2.2.	Tâche 2 : Simulation d'une semaine d'utilisation	19
4.2.3.	Tâche 3 :Bilan de fin de semaine.....	20
4.2.4.	Tâche 4 : Mise en perspective avec usage réel	21
4.2.5.	Tâche 5 : Projection dans un usage quotidien	21
4.2.6.	Tâche 6 : Discussion sur les alternatives	22
4.2.7.	Tâche 7 : Discussion sur le service web complémentaire	23
5.	Analyse.....	23
5.1.	Comparaison avec attentes initiales	23
5.1.1.	Hypothèse 1 : Compréhension intuitive.....	23
5.1.2.	Hypothèses 2 et 3 : Impact émotionnel et comportemental.....	24
5.1.3.	Hypothèses 4 et 5 : Acceptabilité et intégration.....	24
5.1.4.	Hypothèse 6 : Intérêt pour des alternatives	24
5.1.5.	Hypothèse 7 : Attentes pour le service web	24
5.2.	Corrélation entre données quantitatives et qualitatives.....	24
5.3.	Problèmes identifiés	25
5.3.1.	Matrice de priorisation (Fréquence × Sévérité)	25
5.3.2.	Matrice des priorités (Effort × Impact)	26
6.	Recommandations	27
6.1.	LED peu intuitive et mal représentée dans le test.....	27
6.2.	Impact émotionnel négatif sans possibilité de récupération	27
6.3.	Fanaison trop abrupt et décalage avec les données	28
6.4.	Incohérence perçue dans l'alimentation de l'objet.....	28
7.	Conclusion.....	29
7.1.	Ouverture.....	29

8. Bibliographie	30
------------------------	----

III. Table des figures

Figure 1 - Plan de la mise en place du test (Salle de laboratoire ou chez individu)	7
Figure 2 - Tâche 2 – Simulation d’une semaine d’utilisation : Page de définition du seuil personnel..	10
Figure 3 - Tâche 2 – Simulation d’une semaine d’utilisation : Page du lundi – sélection des activités	10
Figure 4 - Résultats UEQ : graphique en barres des moyennes par dimension	17
Figure 5 - Matrice de priorisation (Fréquence × Sévérité)	25
Figure 6 - Matrice des priorités (Effort × Impact).....	26

IV. Liste des tableaux

Tableau 1 - Récapitulatif des documents et équipements nécessaires à la conduite du test utilisateur	7
Tableau 2 - Scénarios de test et tâche	8
Tableau 3 - Synthèse des profils des participants au pré-test	12
Tableau 4 - Synthèse des réponses sur la sensibilité environnementale, les attentes initiales et le rapport aux objets interactifs.....	13
Tableau 5 - Résultats du questionnaire SEQ par tâche et moyenne	14
Tableau 6 - Résultats du questionnaire SUS.....	16
Tableau 7 - Résultats UEQ : récapitulatif des moyennes par dimension	17
Tableau 8 - Retours qualitatifs, Tâche 1 : Première interaction spontanée	19
Tableau 9 - Retours qualitatifs, Tâche 2 : Simulation d’une semaine d’utilisation	19
Tableau 10 - Retours qualitatifs, Tâche 3 : Bilan de fin de semaine	20
Tableau 11 - Retours qualitatifs, Tâche 4 : Mise en perspective avec usage réel.....	21
Tableau 12 - Retours qualitatifs, Tâche 5 : Projection dans un usage quotidien.....	21
Tableau 13 - Retours qualitatifs, Tâche 6 : Discussion sur les alternatives.....	22
Tableau 14 - Retours qualitatifs, Tâche 7 : Discussion sur le service web complémentaire.....	23

1. Introduction

1.1. Contexte du test

Ce test utilisateur s'inscrit dans le cadre d'un Travail de Bachelor réalisé pour le Media Engineering Institute (MEI) (1). Le projet vise à concevoir et développer un prototype tangible capable de rendre perceptible l'impact énergétique des usages numériques domestiques.

Le dispositif, prenant la forme d'une fleur connectée, traduit de manière physique deux types d'informations :

- l'intensité de consommation instantanée (via un système de LED),
- l'accumulation hebdomadaire de consommation (via un mécanisme de fanaison progressif).

L'objectif initial était de disposer, dans le cadre temporel du TB, d'un prototype fonctionnel suffisamment tôt pour intégrer les ajustements issus du test final. Cependant, le calendrier du projet ne permet pas d'effectuer ces modifications avant le rendu final. Le test a donc pour rôle principal de valider la pertinence du prototype actuel, tout en recueillant des données critiques et des recommandations en vue d'itérations ultérieures.

Ce test permettra :

- de confirmer la compréhension et la lisibilité du fonctionnement de la fleur connectée,
- d'évaluer l'ergonomie et l'impact émotionnel de l'interaction,
- d'identifier les éventuelles difficultés d'utilisation,
- de recueillir des suggestions pour de futures améliorations et pour le développement d'une interface web complémentaire.

En somme, il s'agit d'un test de validation combinant des mesures quantitatives et qualitatives, visant à obtenir un regard critique structuré sur le dispositif, ses points forts et ses limites, afin d'alimenter des ajustements post-projet.

1.2. Objectifs du test

Le test utilisateur final vise à :

1. **Valider l'intuitivité** et l'efficacité des interactions offertes par le prototype tangible.
2. **Évaluer la compréhension immédiate** du fonctionnement du dispositif à travers des scénarios concrets.
3. **Mesurer l'impact émotionnel** et la capacité de l'objet à inciter une réflexion ou un changement de comportement face à la consommation numérique.
4. **Identifier les points forts, limites et difficultés d'usage**, notamment en termes d'usabilité et d'ergonomie.
5. **Recueillir des retours qualitatifs** sur des concepts alternatifs non implémentés et sur leur potentiel en tant que leviers comportementaux.
6. **Explorer les attentes** vis-à-vis d'une interface web complémentaire, encore à concevoir.

1.3. Hypothèses UX

- **H1** : Les utilisateurs comprennent immédiatement le sens des informations transmises par la fleur connectée, sans explication préalable.
- **H2** : L'interaction tangible déclenche une réflexion spontanée sur la consommation numérique.
- **H3** : L'interaction génère une émotion suffisamment forte pour encourager un changement d'attitude.
- **H4** : Le prototype est perçu comme simple, agréable et non intrusif au quotidien.
- **H5** : Les utilisateurs se projettent avec l'objet chez eux et jugent son intégration réaliste.
- **H6** : Les concepts alternatifs discutés suscitent un intérêt ou une préférence marquée.
- **H7** : Les utilisateurs expriment des attentes claires et pertinentes pour une interface web complémentaire.

2. Méthodologie

Le test utilisateur a été mené en présentiel, selon un protocole modéré et individuel. Chaque session combinait :

- Observation directe du participant durant l'interaction avec le prototype tangible.
- Pensée à voix haute (think-aloud), encourageant l'expression spontanée des impressions et raisonnements.
- Entretiens semi-dirigés post-scénarios, permettant d'explorer les perceptions, les difficultés et les suggestions.

En raison des contraintes de planning liées à l'avancement du Travail de Bachelor, la date précise de réalisation des tests n'a pu être fixée qu'à la fin du développement. Cette situation a nécessité un recrutement rapide des participants, entraînant une organisation mixte :

- 2 sessions réalisées dans un environnement contrôlé à la HEIG-VD.
- 3 sessions effectuées au domicile des participants, afin de garantir un nombre suffisant de retours dans le temps imparti.

Des tests standardisés (SEQ, SUS, UEQ) ont été intégrés pour compléter les données qualitatives par des mesures quantitatives objectives. L'approche visait à :

- Reproduire au mieux les conditions d'usage réelles via une simulation complète d'une semaine d'utilisation.
- Garantir une phase de découverte neutre afin de mesurer la compréhension intuitive.

Croiser les données observées, déclarées et mesurées pour obtenir une vision complète de l'expérience utilisateur.

2.1.1. Matériel utilisé

Documents	Équipement	Nbre
Formulaire de consentement (vidéo/audio)	Ordinateur (Dell XPS 15 9520) pour la captation vidéo/audio et pour l'usage du programme de simulation de la fleur.	1x
Script modérateur	Prototype fonctionnel	1x
Questionnaire pré-test	Table	1x
Questionnaire SEQ	Chaise	1x
Questionnaire SUS	Stylo	2x
Questionnaire UEQ		

Tableau 1 - Récapitulatif des documents et équipements nécessaires à la conduite du test utilisateur

2.1.2. Plan

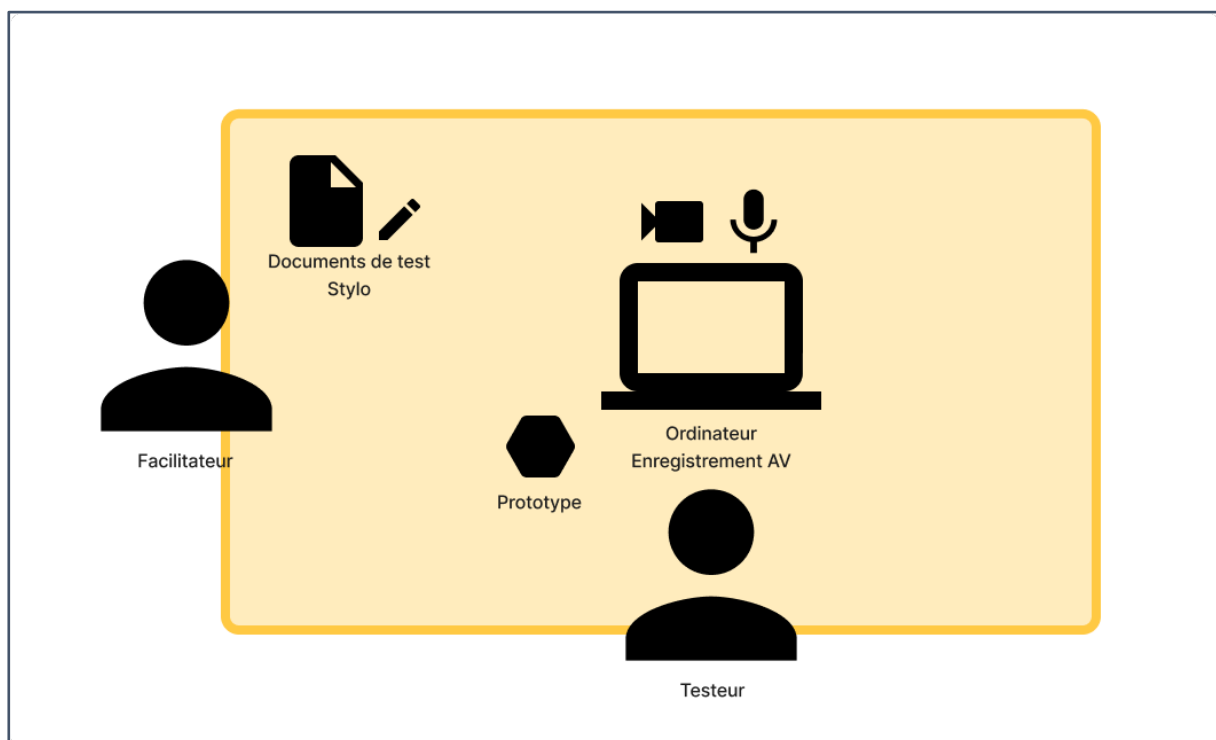


Figure 1 - Plan de la mise en place du test (Salle de laboratoire ou chez individu)

2.2. Scénarios de test et tâches

Tâche	Consigne	Critère de succès	Hypothèse associée
T1 – Découverte libre	Observer librement la fleur connectée sans explication préalable et décrire ce qu'elle représente ou pourrait indiquer.	Le participant comprend que l'objet représente sa consommation numérique ou écologique (même partiellement).	H1
T2 – Simulation d'une semaine	Configurer un seuil personnel, puis simuler une semaine d'utilisation via l'interface web, en choisissant et lançant des activités numériques. Observer les réactions de la fleur (LED et fanaïson) après chaque action.	Compréhension claire de la signification des deux modalités (fanaïson hebdomadaire / LED instantanée) et capacité à relier ces signaux aux activités effectuées.	H1, H2, H3
T3 – Bilan de fin de semaine	Expliquer ce qui a été compris du fonctionnement global et décrire les ressentis vécus pendant la simulation.	Formulation claire du lien entre les actions effectuées et l'état final de la fleur.	H2, H3, H4, H5
T4 – Projection dans un usage réel	Imaginer la fleur dans un environnement domestique réel et décrire comment elle s'intégrerait dans le quotidien.	Capacité à se projeter et à juger l'intégration réaliste et non intrusive.	H4, H5
T5 – Discussion sur les concepts alternatifs	Réagir à la présentation de concepts tangibles alternatifs (non implémentés) et exprimer une préférence ou des idées nouvelles.	Intérêt ou préférence exprimée pour au moins un concept alternatif.	H6
T6 – Discussion sur l'interface web complémentaire	Décrire ce qu'une interface web associée à la fleur devrait contenir et comment elle serait utilisée.	Expression d'attentes claires et pertinentes pour l'interface web.	H7

Tableau 2 - Scénarios de test et tâche

2.2.1. Tâche 2 – Simulation d’une semaine d’utilisation

Cette tâche visait à évaluer la compréhension des signaux physiques émis par la fleur connectée et leur lien avec les actions numériques réalisées.

Le participant configurait d’abord un seuil personnel de consommation hebdomadaire dans l’interface web. Il simulait ensuite une semaine complète, chaque journée étant représentée par une série d’activités numériques (streaming vidéo, réseaux sociaux, navigation web, téléchargement, etc.) matérialisées sous forme de cartes interactives.

À chaque sélection d’activité :

- LED : indiquait en temps réel l’intensité de la consommation (vert = faible, orange = moyenne, rouge = forte).
- Fanaison de la fleur : évoluait progressivement pour représenter la consommation cumulée sur la semaine.

En fin de journée simulée, le participant répondait à deux questions courtes :

1. Ce qu’il avait compris du comportement de la fleur.
2. Ce qu’il avait ressenti face à ces réactions.

L’objectif de cette tâche était double :

1. Valider la compréhension simultanée des deux modalités d’information (instantanée et cumulative).
2. Observer l’impact émotionnel et la capacité du dispositif à influencer les choix d’activités au fil de la simulation.

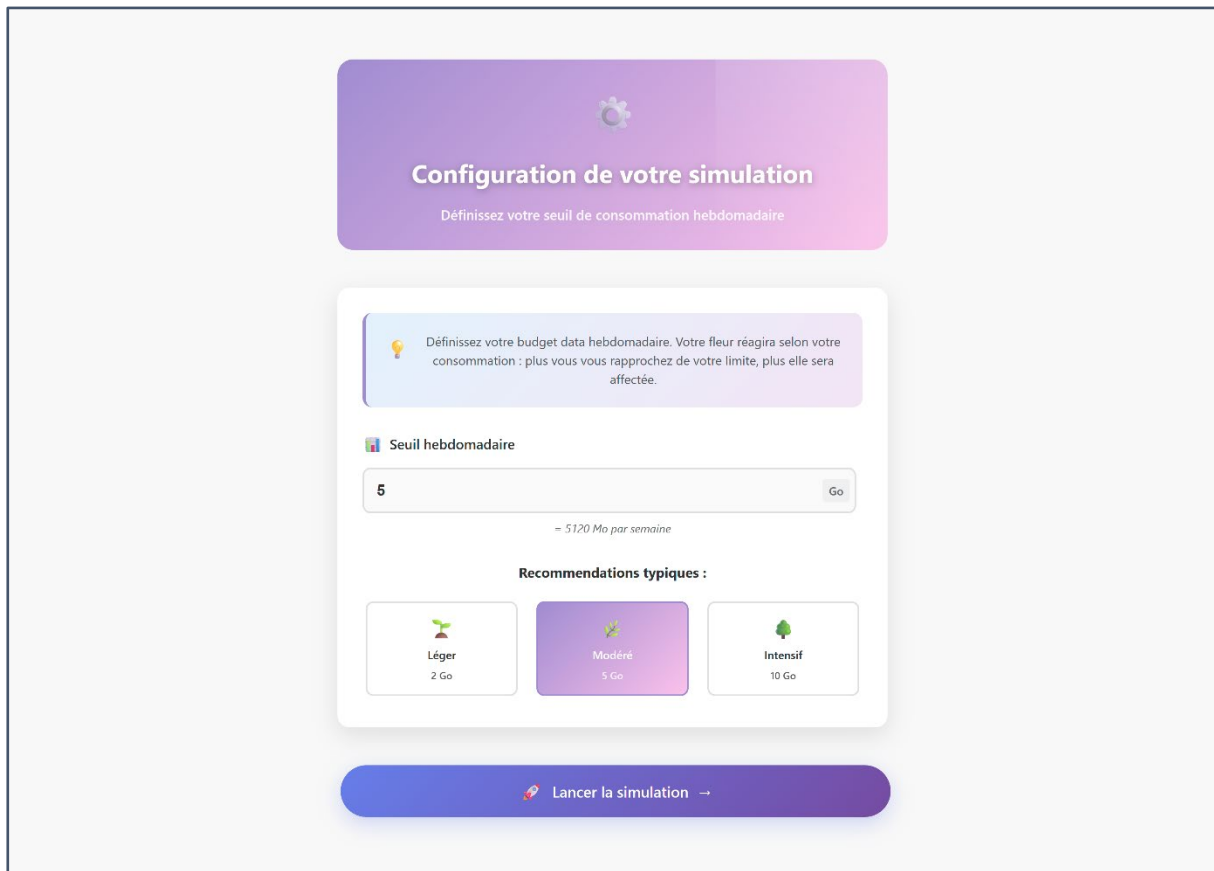


Figure 2 - Tâche 2 – Simulation d'une semaine d'utilisation : Page de définition du seuil personnel

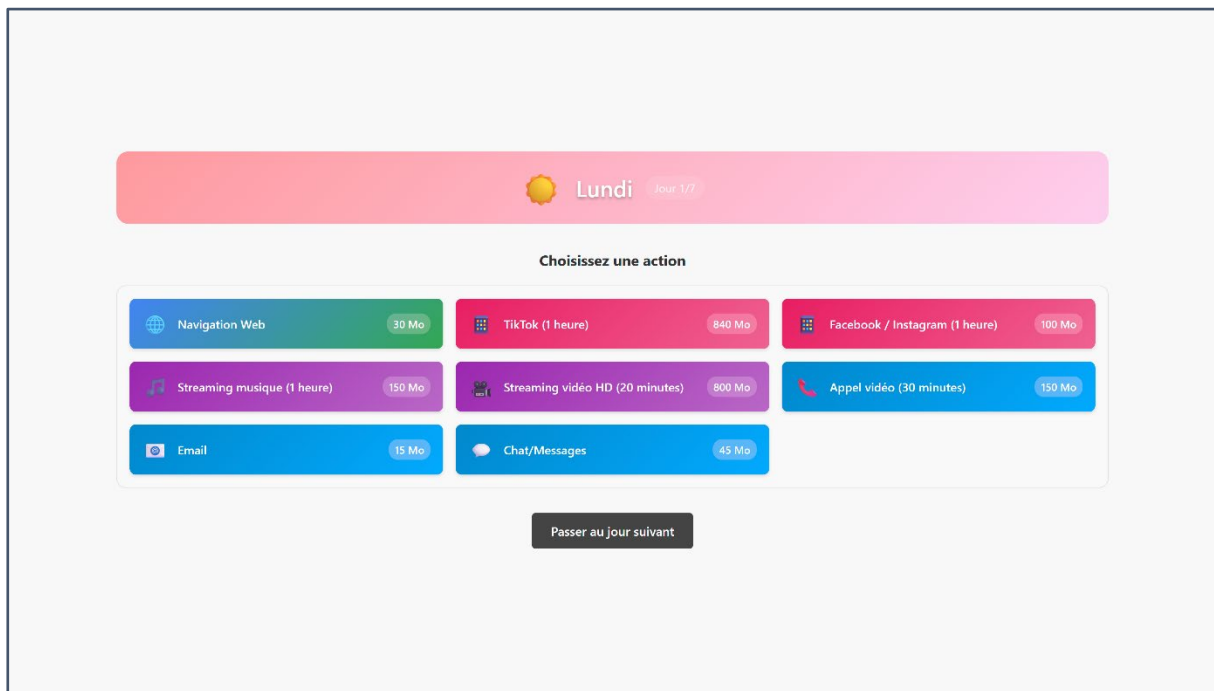


Figure 3 - Tâche 2 – Simulation d'une semaine d'utilisation : Page du lundi – sélection des activités

3. Profil des participants

Cinq participants ont pris part au test utilisateur, conformément aux recommandations de Nielsen (2), selon lesquelles ce nombre permet d'identifier la majorité des problèmes d'utilisabilité tout en restant gérable dans un contexte de Travail de Bachelor.

3.1. Critères de sélection

Les participants ont été recrutés pour représenter un public proche des utilisateurs finaux visés par le dispositif :

- **Âge** : 20 à 40 ans.
- **Niveau de familiarité technologique** : varié, allant de non-initié à utilisateur averti.
- **Lieu de vie** : logement avec connexion internet domestique.
- **Utilisation numérique** : usages réguliers de services tels que le streaming vidéo, les réseaux sociaux, le cloud, la navigation web ou le téléchargement de fichiers volumineux.
- **Sensibilité environnementale** : au moins une partie des participants ayant une conscience ou un intérêt pour les enjeux énergétiques et écologiques.

3.1.1. Critères d'exclusion

Aucun participant ne devait :

- Avoir contribué à la conception du prototype.
- Avoir déjà testé une version antérieure du dispositif (afin d'éviter un biais de familiarité).

3.2. Profils effectifs des participants

L'échantillon est composé de cinq participants, tous de genre masculin, présentant une diversité de parcours académiques et professionnels. L'âge varie de 24 à 29 ans. Tous déclarent un usage numérique régulier à intensif, avec une moyenne d'utilisation comprise entre 3,8/5 et 4,6/5 selon l'échelle de fréquence.

Trois participants disposent de compétences techniques avancées en informatique, développement ou design, tandis que les deux autres ont un profil plus éloigné des métiers du numérique, bien qu'ils utilisent intensivement les outils digitaux dans leur vie quotidienne.

Le niveau de confort avec les technologies est élevé pour l'ensemble du groupe. Cette homogénéité traduit une aisance certaine avec les dispositifs numériques, tout en laissant place à des variations dans la nature et l'intensité des usages. Les contextes de vie des participants sont variés : l'un réside en maison individuelle avec sa famille, tandis que les autres vivent en appartement. Parmi eux, on compte un participant en colocation, un vivant seul, un en couple et un autre en famille.

Cette composition permet d'évaluer le prototype à la fois auprès d'utilisateurs familiers avec la conception et le développement, susceptibles de fournir des retours détaillés sur l'ergonomie, et auprès de profils non techniques, offrant un regard centré sur la compréhension intuitive et l'accessibilité du dispositif.

Participant	Âge	Genre	Profession	Type de logement	Usage numérique moyen (1-5)	Niveau de confort technologique
1	27	Homme	Étudiant ingénieur agronome	Maison	4,6	Élevé
2	29	Homme	Conseiller de vente automobile	Appartement	4,0	Élevé
3	25	Homme	Étudiant ingénieur informaticien en emploi	Appartement	3,8	Élevé
4	24	Homme	Étudiant ingénieur informaticien	Appartement	4.25	Élevé
5	28	Homme	Ingénieur logiciel	Appartement	4.5	Élevé

Tableau 3 - Synthèse des profils des participants au pré-test

3.2.1. Sensibilité environnementale, attentes initiales et rapport aux objets interactifs

Le questionnaire pré-test a permis d'affiner le profil des participants sur quatre axes :

- Sensibilité écologique et énergétique
- Attentes initiales vis-à-vis du dispositif
- Sensibilité aux enjeux énergétiques
- Rapport aux objets physiques et interactifs

Critère	P1	P2	P3	P4	P5
Sensibilité à l'impact environnemental du numérique	Moyennement	Moyennement	Moyennement	Un peu	Moyennement
Mesures déjà prises pour réduire l'impact	Pas sûr-e – Nettoyage boîte mail / Limiter recherche internet	Non	Oui – Effacer mes mails	Non	Non
Attentes initiales (intérêt pour l'objet)	Intéressant	Intéressant	Intéressant	Intéressant	Intéressant
Motivation exprimée	Se rendre compte de notre consommation énergétique	Avoir conscience de la dépense d'énergie	Pour avoir une meilleure idée de mon impact technologique	—	Pour mieux se rendre compte
Sensibilité à l'impact écologique du numérique	Assez	Moyennement	Moyennement	Un peu	Moyennement
Connaissance des effets environnementaux	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Déjà utilisé des objets connectés ou interactifs	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
À l'aise avec un objet communiquant par forme/lumière/mouvement	Oui	Oui	Oui	Pas sûr-e	Oui

Tableau 4 - Synthèse des réponses sur la sensibilité environnementale, les attentes initiales et le rapport aux objets interactifs

3.2.2. Tendances issues du questionnaire pré-test

Les participants manifestent un intérêt unanime pour l'idée d'un objet tangible permettant de visualiser la consommation numérique. Les motivations principales relèvent de la prise de conscience et de la meilleure compréhension de l'impact environnemental des usages numériques.

La sensibilité à l'impact écologique du numérique est majoritairement moyenne, avec un seul participant se déclarant « assez » sensible et un autre « un peu ». Peu de mesures concrètes ont déjà été mises en place, et celles-ci concernent surtout la gestion des e-mails et la réduction des recherches internet.

La majorité des participants a déjà utilisé des objets connectés ou interactifs, et tous se déclarent à l'aise ou potentiellement à l'aise avec un dispositif communiquant via des signaux physiques (forme, lumière, mouvement), à l'exception d'un participant se disant « pas sûr ».

Ces éléments confirment la pertinence du dispositif comme outil de sensibilisation, tout en soulignant la nécessité de signaux clairs et explicites pour assurer une compréhension immédiate.

4. Résultats

4.1. Quantitatifs

4.1.1. Single Ease Question (SEQ)

Tâche	P1	P2	P3	P4	P5	Moyenne
Première interaction spontanée	6	7	5	7	5	6,0
Configuration initiale	4	5	7	7	4	5,4
Déroulements journaliers	5	3	5	5	6	4,8
Bilan de fin de semaine	4	2	6	7	6	5,0
Projection dans un usage quotidien	5	4	7	7	6	5,8
Discussion sur les alternatives	2	6	5	7	4	4,8
Discussion sur le service web	5	4	6	7	6	5,6

Tableau 5 - Résultats du questionnaire SEQ par tâche et moyenne

- **Première interaction spontanée (M = 6,0)**

Étape clé pour mesurer la réception initiale du prototype. Les participants ont globalement trouvé l'objet simple à appréhender et ont pu s'imaginer son fonctionnement sans explication préalable.

- **Déroulements journaliers (M = 4,8)**

Les notes plus basses s'expliquent par certaines limites de l'interface web de simulation. Les participants comprenaient bien la signification du fanaison de la tige, mais moins celle de la LED, dont l'usage était plus difficile à interpréter sans explication. Pour ce test, la LED réagissait de manière similaire à la tige (forte baisse = rouge, consommation faible = vert). Un participant a davantage regardé l'écran que le prototype, malgré plusieurs rappels que le test concernait l'objet physique. Tous ont néanmoins été surpris et émotionnellement marqués lorsque la plante a baissé abruptement après une consommation simulée importante.

- **Bilan de fin de semaine (M = 5,0)**

Moment privilégié pour obtenir un retour global sur la simulation et la compréhension du prototype. Jusqu'à cette étape, aucune explication technique n'avait été donnée : tous ont bien compris l'interaction de la tige, mais l'apport de la LED est resté flou pour les raisons évoquées précédemment.

- **Projection dans un usage quotidien (M = 5,8)**

Cette tâche a confirmé une forte acceptabilité du dispositif, les participants suggérant spontanément de l'installer dans un lieu de passage (salon, couloir). Aucun obstacle majeur n'a été exprimé.

- **Discussion sur les alternatives (M = 4,8)**

Moins bien notée car elle exigeait un effort d'imagination et de réflexion créative. Les participants ont parfois eu du mal à proposer des idées spontanées. Un guide plus structuré avec des questions ciblées aurait probablement facilité cette étape.

- **Discussion sur le service web (M = 5,6)**

Même contrainte d'imagination que pour les alternatives, mais un intérêt unanime a été exprimé pour disposer de données analytiques. Un participant a proposé un système de récompenses et de classement en ligne, confirmant un besoin de référence sociale identifié lors de la pré-étude

4.1.2. System Usability Scale (SUS)

Participant	Score SUS
P1	85
P2	93,75
P3	77,5
P4	92,5
P5	82,5
Moyenne	86,25

Tableau 6 - Résultats du questionnaire SUS

- Selon l'échelle d'acceptabilité de Bangor et al. (3), ce score place le prototype dans la zone "Excellent", proche de la catégorie "Best Imaginable" (>90).
- Tous les participants ont attribué un score supérieur à 77,5, ce qui traduit une expérience utilisateur homogène et positive.
- Les scores les plus élevés (P2 = 93,75 et P4 = 92,5) suggèrent un ressenti particulièrement favorable vis-à-vis de la simplicité et de la fluidité d'utilisation.
- Même le score le plus bas (P3 = 77,5) reste bien au-dessus de la moyenne de référence, confirmant que les éventuelles difficultés rencontrées n'ont pas altéré l'appréciation globale.

4.1.3. User Experience Questionnaire (UEQ)

4.1.3.1. Compréhension et apport de l'UEQ

Le User Experience Questionnaire (UEQ) est un outil standardisé permettant de mesurer l'expérience utilisateur perçue selon six dimensions distinctes :

- **Attraction** : Impression globale du produit, agréabilité et satisfaction générale.
- **Compréhensibilité** : Clarté, facilité de compréhension et d'apprentissage.
- **Efficacité** : Rapidité et effort nécessaire pour accomplir les tâches.
- **Contrôlabilité** : Sentiment de contrôle et prévisibilité de l'interaction.
- **Stimulation** : Intérêt, motivation et plaisir d'utilisation.
- **Originalité** : Caractère innovant et original perçu.

Chaque item est évalué sur une échelle de -3 (accord total avec le pôle négatif) à +3 (accord total avec le pôle positif), et les valeurs positives indiquent une évaluation favorable. Les trois premières dimensions (Compréhensibilité, Efficacité, Contrôlabilité) relèvent de la qualité pragmatique (orientée tâches), tandis que Stimulation et Originalité mesurent la qualité hédonique (plaisir, attrait, innovation) (4). Attraction est une mesure synthétique globale influencée par les autres (5).

L'UEQ est particulièrement utile car il combine :

- Une mesure rapide (3 à 5 minutes) adaptée à différents contextes de test.
- Une granularité fine qui met en évidence les forces et faiblesses UX.
- Un benchmark international permettant de situer un produit par rapport à un large panel d'applications comparables (6).

En complément, des approches récentes proposent de pondérer ces résultats en fonction de l'importance perçue des dimensions pour obtenir un UEQ KPI utilisable comme indicateur synthétique pour la prise de décision (7).

4.1.3.2. Analyse des résultats

UEQ Scales (Mean and Variance)		
Attraction	1,833	0,15
Compréhensibilité	2,050	0,14
Efficacité	1,250	0,47
Contrôlabilité	0,950	0,23
Stimulation	1,700	0,45
Originalité	2,250	0,13

Tableau 7 - Résultats UEQ : récapitulatif des moyennes par dimension

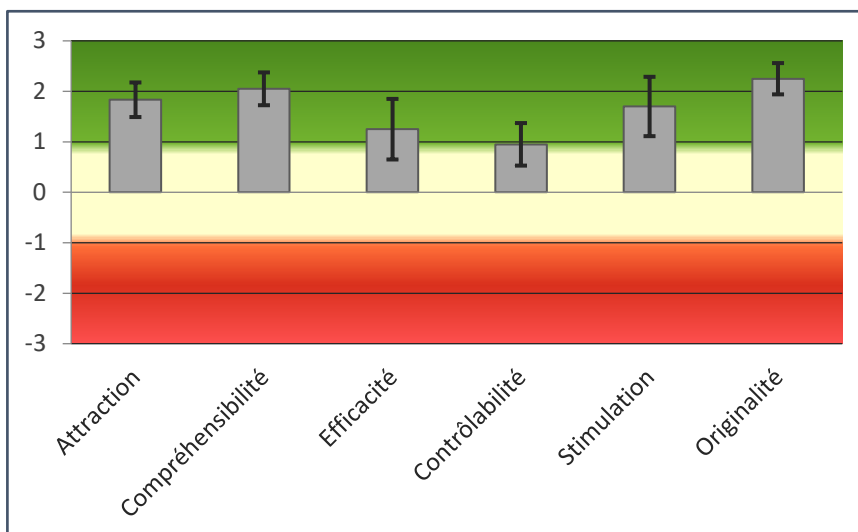


Figure 4 - Résultats UEQ : graphique en barres des moyennes par dimension

Les résultats de l'UEQ pour le prototype sont globalement positifs sur toutes les dimensions :

- **Originalité (2,25)** et **Compréhensibilité (2,05)** affichent les scores les plus élevés, traduisant un caractère innovant fort et une bonne compréhension de l'objet. Ces résultats sont supérieurs aux valeurs moyennes observées dans le benchmark UEQ, ce qui place le prototype dans la catégorie Excellent pour ces deux dimensions.
- **Attraction (1,83)** et **Stimulation (1,70)** montrent que le dispositif est apprécié et motivant, soutenant un engagement émotionnel qui a été confirmé par les réactions observées lors des tests.
- **Efficacité (1,25)** bien que positif, interpelle car il est difficile de déterminer si son score traduit une perception de frictions dans l'utilisation ou un doute sur l'impact réel du dispositif. Les participants ont peut-être estimé que le prototype, dans son état actuel, n'aurait pas d'effet concret sur leur comportement, ou bien qu'il manquait de leviers d'action clairs. Enfin, comme pour la Contrôlabilité, cette valeur pourrait être liée aux spécificités de l'évaluation d'une interface tangible, un contexte moins courant dans les tests UX.
- **Contrôlabilité (0,95)**, ce score, le plus bas des six dimensions, reste globalement favorable mais révèle un point de vigilance important. La nature même du prototype, à savoir un dispositif de data visualisation qui reflète la consommation numérique sans possibilité d'action directe, peut générer un sentiment d'impuissance. Les participants peuvent avoir l'impression que la fleur est "vouée à faner" et qu'ils n'ont aucun contrôle sur son état. Comme le premier test utilisateur l'avait déjà suggéré, ce ressenti pourrait être perçu très négativement et, à terme, inciter à cesser d'utiliser le produit. Ce constat souligne la nécessité d'intégrer un mécanisme permettant de faire remonter la fleur ou, au minimum, de repenser l'échelle de fanaison, par exemple en adoptant une progression logarithmique, afin de maintenir la motivation et éviter un découragement rapide.

En résumé, le profil UEQ met en évidence un prototype clair, original et engageant, mais qui gagnerait à améliorer le sentiment de maîtrise en renforçant la perception de contrôle et la prévisibilité du fonctionnement. L'impression que la fleur est vouée à faner sans possibilité d'action pourrait décourager l'usage. L'intégration d'un mécanisme permettant de faire remonter la fleur, ou l'adoption d'une échelle de fanaison moins brutale, par exemple logarithmique, pourrait contribuer à maintenir l'engagement et la motivation des utilisateurs sur le long terme.

4.2. Qualitatifs

4.2.1. Tâche 1 : Première interaction spontanée

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H1	Associe la fleur à un objet décoratif	Positif : attire visuellement. Difficulté : message pas toujours clair.	« C'est une plante quoi... c'est intéressant »
H1	Suppose un lien avec la consommation numérique ou l'impact écologique	Positif : certains comprennent le but général.	« Je sais que ça sert à montrer la consommation »
H1	Observe la LED et cherche à en déduire la fonction	Difficulté : interprétation incomplète sans contexte.	« C'est une lumière... elle s'allume en fonction de quelque chose »

Tableau 8 - Retours qualitatifs, Tâche 1 : Première interaction spontanée

4.2.2. Tâche 2 : Simulation d'une semaine d'utilisation

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H1, H2	Comprend que la tige reflète la consommation	Positif : interprétation correcte de la tige.	« Clairement, la fleur a réagi à ma consommation de données »
H1	Comprend moins bien l'usage de la LED sans explication	Difficulté : LED perçue comme moins claire, confusion possible avec clignotement décoratif.	« Je ne savais pas à quoi servait la LED »
H2	Ressent un frein émotionnel après un fanaison abrupt	Positif : impact émotionnel immédiat, incite à réfléchir aux choix suivants.	« Ça m'a un peu freiné quand j'ai vu la réaction » (P4)
H3	Se dit touché ou attristé par l'état de la fleur	Positif : levier émotionnel identifié. Difficulté : impact trop négatif.	« Ça m'a fait réfléchir... ça faisait du mal de la voir descendre »
H2, H3	Modifie ses choix d'activités après réaction négative de la fleur	Positif : influence sur le comportement simulé.	« J'hésitais à mettre des actions très consommatrices »
H1	Focalise l'attention sur l'écran plutôt que sur l'objet	Difficulté : perte d'observation de la fleur pendant l'animation.	« Quand je remplissais des trucs sur l'écran, je voyais moins la fleur »
H2	Perçoit la LED rouge comme un avertissement clair	Positif : compréhension intuitive du rouge = forte consommation.	« Rouge, ça voulait dire que c'était une grosse consommation »

Tableau 9 - Retours qualitatifs, Tâche 2 : Simulation d'une semaine d'utilisation

4.2.3. Tâche 3 :Bilan de fin de semaine

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H1	Exprime avoir compris le lien global entre consommation et fanaison	Positif : bonne compréhension générale.	« Ça réagit à la consommation de données... la fleur se met en PLS quand je consomme »
H1	Comprend la LED comme indicateur instantané (vert/rouge), mais parfois sans percevoir toutes les couleurs	Difficulté : certaines nuances (jaune) peu visibles ou ignorées.	« J'ai vu seulement le vert et le rouge »
H3	Ressent de la tristesse ou de la gêne face à la fleur fanée	Positif : impact émotionnel confirmé. Difficulté : impact trop négatif.	« C'est un peu triste... je préfère qu'elle soit pas tout en bas »
H2, H3	Réfléchit à ses comportements numériques après l'expérience	Positif : potentiel levier de sensibilisation.	« Ça pourrait me faire réfléchir à ce que je fais »
H2, H3	Imagine des actions pour réduire la consommation (ex. télécharger plutôt que streamer)	Positif : identification spontanée de stratégies d'optimisation.	« Je pourrais télécharger la musique et l'écouter en local » (P5)
H1, H3	Remarque que la rapidité de la dégradation peut être décourageante	Difficulté : perception d'un rythme trop sévère.	« L'état de santé s'est dégradé direct, ça a mis un frein »
H1, H3	Étonné par l'ampleur du fanaison par rapport au pourcentage de données consommées	Difficulté : perception d'un décalage entre indicateur visuel et usage de données.	« À 55 %, la fleur est quasi morte »
H1	Ne perçoit pas toutes les couleurs de la LED car daltonien	Difficulté : limite d'accessibilité liée à la vision des couleurs.	« Je n'ai pas vu les couleurs car je suis daltonien »

Tableau 10 - Retours qualitatifs, Tâche 3 :Bilan de fin de semaine

4.2.4. Tâche 4 : Mise en perspective avec usage réel

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H1	Comprend que le fonctionnement réel serait basé sur une mesure automatique via le routeur	Positif : clarification du dispositif.	« Ce serait super cool si ça capte tout ce que tu fais »
H3	Réagit à l'idée que le fanaison puisse être moins linéaire	Positif : intérêt pour une dégradation plus progressive.	« T'as vite un impact émotionnel fort alors que t'es qu'à 55 % »
H1, H2	Découvre la fonction exacte de la LED comme indicateur instantané du débit	Positif : meilleure compréhension après explication.	« Ah, c'est en fonction de ton débit sur les 2 dernières minutes »
H3	Estime que l'indication instantanée peut devenir trop complexe	Difficulté : préfère un retour simple basé uniquement sur le fanaison.	« Moi j'aime bien le côté très simple, juste une fleur »
H3	Suggère un fonctionnement plus réaliste visuellement (pétales fanant)	Positif : renforce l'analogie avec une plante réelle.	« C'est plutôt les pétales qui fanent »

Tableau 11 - Retours qualitatifs, Tâche 4 : Mise en perspective avec usage réel

4.2.5. Tâche 5 : Projection dans un usage quotidien

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H4, H5	Propose de placer la fleur dans un lieu de passage (salon, couloir)	Positif : emplacement favorisant la visibilité et l'attention régulière.	« Je la mettrais dans un endroit de passage »
H5	Imagine que l'attention diminuerait avec le temps mais resterait présente inconsciemment	Positif : perception d'un usage passif possible.	« Au début je regarderais tout le temps, après ça deviendrait inconscient »
H4, H5	Voit un avantage à un objet physique par rapport à un suivi sur téléphone	Positif : visibilité immédiate sans action de consultation.	« Sur mon téléphone, faut que j'aie à voir, alors que là c'est devant moi »
H5	Considère l'objet acceptable esthétiquement dans un foyer	Positif : intégration perçue comme réaliste.	« Je pense que ça s'intégrerait bien dans le décor »

Tableau 12 - Retours qualitatifs, Tâche 5 : Projection dans un usage quotidien

4.2.6. Tâche 6 : Discussion sur les alternatives

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H6	Apprécie le comportement actuel mais souhaiterait plus de réalisme visuel	Positif : rapprochement avec un objet décoratif naturel	« Avec plus de réalisme, ça s'intégrerait mieux dans le décor »
H6	Préfère que l'objet soit branché en continu plutôt que sur batterie courte	Positif : praticité d'usage au quotidien	« Je préfère le laisser branché que devoir le déplacer pour le charger »
H6	Trouve contradictoire de sensibiliser à la consommation avec un objet branché en permanence	Difficulté : incohérence perçue entre le message et le fonctionnement	« C'est un peu contradictoire de devoir le brancher h24 »
H6	Souligne que l'autonomie de la batterie influence la perception écologique	Positif : autonomie longue perçue comme un signe d'écoresponsabilité	« S'il tient 2 mois, c'est que ça consomme pas grand-chose »
H6	Propose un mécanisme de récompense permettant à la fleur de remonter après une bonne action	Positif : maintient la motivation et l'engagement	« Si elle pouvait remonter quand on fait quelque chose de bien »
H6	Suggère d'ajouter un retour sonore comme alerte ou récompense	Positif : multiplie les canaux de feedback	« Un son doux si on est dans le vert, une alerte si on dépasse »
H6	Propose un quota journalier affiché par la fleur avec retour lumineux et sonore en cas de dépassement	Positif : facilite la compréhension et la gestion de la consommation	« Ça pourrait indiquer quand on a dépassé le budget du jour »
H6	Précise que le son ne devrait pas être dérangeant pour éviter l'effet négatif	Positif : garantit l'acceptabilité à long terme	« Si son il y a, il ne faut pas qu'il soit agaçant »

Tableau 13 - Retours qualitatifs, Tâche 6 : Discussion sur les alternatives

4.2.7. Tâche 7 : Discussion sur le service web complémentaire

Hypothèses	Comportement observé	Points clés	Verbatims
H7	Intéressé par un suivi sous forme de graphiques et de chiffres pour observer l'évolution	Positif : valorise la visualisation analytique.	« Ça me ferait dire que je me suis amélioré si je voyais un graphique »
H7	Souhaite des alertes ou notifications en cas de dépassement de budget	Positif : fonctionnalité perçue comme utile.	« Attention, vous avez déjà consommé votre budget de la journée »
H7	Propose d'ajouter des conseils personnalisés pour réduire la consommation	Positif : valeur ajoutée pédagogique.	« Des conseils pour améliorer ma consommation »
H7	Souhaite un indicateur de batterie et des alertes de recharge	Positif : gestion pratique de l'objet.	« Voir si il faut la charger ou pas »
H7	Intéressé par un mode compétitif ou comparatif avec d'autres utilisateurs	Positif : motivation par référence sociale.	« Se comparer avec d'autres gens, ça pourrait me motiver »
H7	Trouve déprimant que la fleur ne fasse que se dégrader	Difficulté : risque de découragement.	« C'est un peu déprimant qu'elle puisse que faner »
H7	Suggère d'intégrer un mécanisme de « bonne action » pour faire remonter la fleur	Positif : maintient la motivation et l'engagement.	« Si elle pouvait remonter un peu quand on fait quelque chose de bien »

Tableau 14 - Retours qualitatifs, Tâche 7 : Discussion sur le service web complémentaire

5. Analyse

5.1. Comparaison avec attentes initiales

5.1.1. Hypothèse 1 : Compréhension intuitive

Objectif partiellement atteint. La tige a été bien comprise sans explication, et une fois le fonctionnement de la LED expliqué, les participants l'ont également assimilé. Cependant, durant le test, la LED n'a pas présenté son animation prévue, car la simulation d'une semaine en quelques minutes a conduit à calquer son comportement sur les mouvements de fanaison de la tige. Les avis sur son utilité sont contrastés et mériteraient un approfondissement. Néanmoins, le point positif majeur est que la LED attire le regard et permet de s'informer sur la consommation actuelle, même si, dans un usage réel, elle ne serait pas constamment observée étant donné que l'on ne serait pas toujours à proximité de la fleur.

5.1.2. Hypothèses 2 et 3 : Impact émotionnel et comportemental

Objectif atteint. L'interaction avec la fleur provoque un impact émotionnel fort et influence les choix des participants, ce qui confirme son potentiel en tant que levier de sensibilisation. Cependant, cet effet pourrait devenir trop négatif s'il n'existe pas de mécanisme permettant à la fleur de « remonter » après une bonne action.

5.1.3. Hypothèses 4 et 5 : Acceptabilité et intégration

Objectif atteint. L'intégration dans un foyer est jugée réaliste, avec une préférence marquée pour des emplacements visibles (lieux de passage). Il est intéressant de noter que plusieurs participants ont exprimé le souhait d'un rendu plus réaliste, comme des pétales qui fanent avec la tige, ou une tige et des feuilles au design plus naturel.

5.1.4. Hypothèse 6 : Intérêt pour des alternatives

Objectif atteint, avec plusieurs suggestions constructives sur le design, l'alimentation et les interactions. Toutefois, cette tâche aurait été plus productive si une liste de propositions avait été préparée et soumise aux participants pour orienter et structurer leurs retours.

5.1.5. Hypothèse 7 : Attentes pour le service web

Objectif atteint. Les participants manifestent un fort intérêt pour un suivi analytique, l'ajout de conseils personnalisés et des fonctionnalités de motivation sociale comme la comparaison avec d'autres utilisateurs.

5.2. Corrélation entre données quantitatives et qualitatives

- Les scores élevés du SUS (M = 86,65) confirment la perception globale d'excellente utilisabilité relevée dans les verbatims.
- L'UEQ met en avant Originalité et Compréhensibilité, en phase avec l'engagement initial observé et la compréhension de la tige. Les scores plus bas en Contrôlabilité et Efficacité se reflètent dans les retours verbaux sur le sentiment d'impuissance et la difficulté à interpréter certains signaux.
- Le SEQ montre des tâches initiales bien notées (découverte, projection) et d'autres moins bien notées (simulation journalière, alternatives), ce qui correspond aux verbatims indiquant plus de réflexion et de complexité dans ces étapes.

5.3. Problèmes identifiés

- **LED peu intuitive et mal représentée dans le test**
Rôle difficile à comprendre sans explication, animation réelle non testée, accessibilité réduite pour les daltoniens.
- **Impact émotionnel négatif sans possibilité de récupération**
Fanaïson perçue comme définitif, pouvant décourager à long terme.
- **Fanaïson trop abrupt et décalage perçu avec l'usage de données**
Dégradation forte dès 50 % de consommation, manque de cohérence perçue avec la consommation effective.
- **Incohérence perçue dans l'alimentation de l'objet**
Contradiction entre le message écologique et un branchement continu. Les utilisateurs préfèrent une batterie qui pour eux dénote une consommation faible.

5.3.1. Matrice de priorisation (Fréquence × Sévérité)

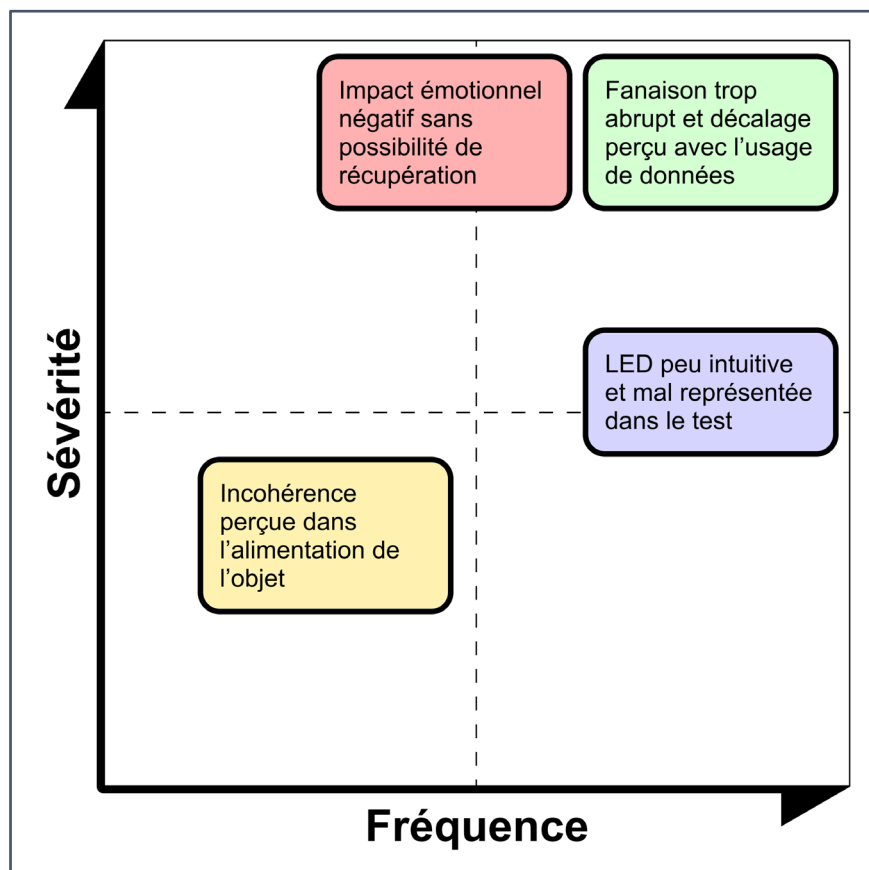


Figure 5 - Matrice de priorisation (Fréquence × Sévérité)

5.3.2. Matrice des priorités (Effort × Impact)

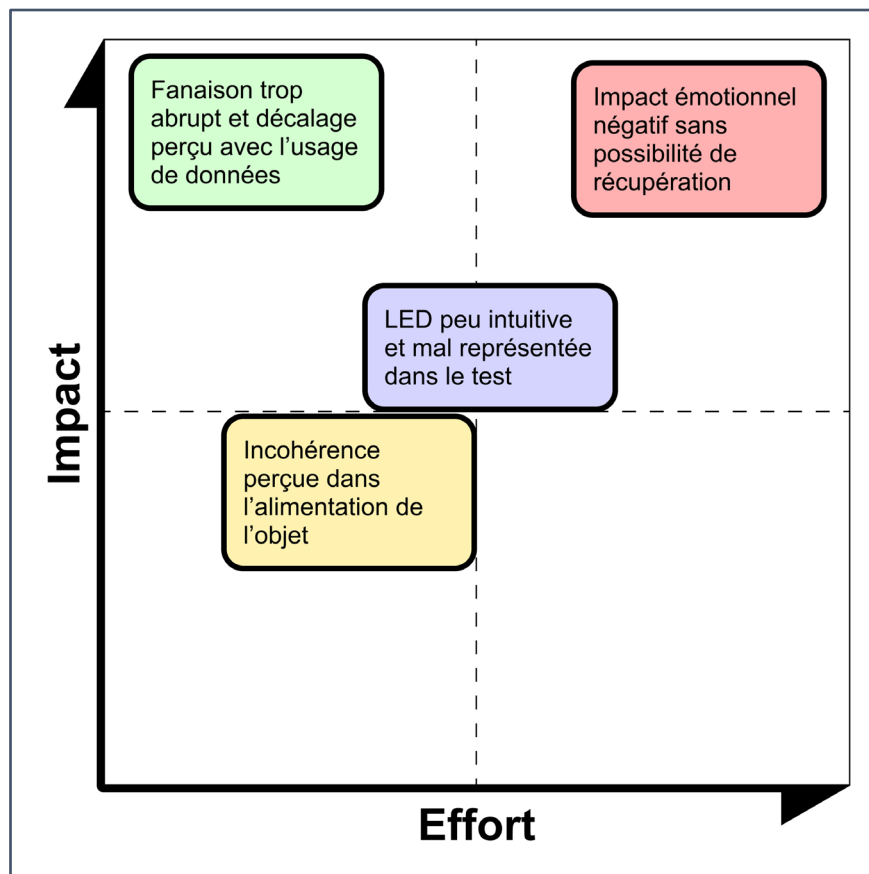


Figure 6 - Matrice des priorités (Effort × Impact)

6. Recommandations

6.1. LED peu intuitive et mal représentée dans le test

Je recommande de mener des tests supplémentaires spécifiquement centrés sur la LED et ses animations, car son fonctionnement n'a pas pu être pleinement évalué dans le cadre de ce test utilisateur.

Les éléments clés ressortis des retours :

- La présence de lumière attire le regard et a reçu de bons retours.
- Une explication reste nécessaire pour que les utilisateurs comprennent le fonctionnement et le message transmis.
- Une réflexion doit être menée sur l'utilité réelle de la LED, certains participants ayant indiqué qu'ils ne seraient pas toujours à proximité de l'objet pour l'observer.
- Certains participants perçoivent la LED comme un élément pouvant donner l'impression d'une forte consommation électrique.
- Le fonctionnement est bien reçu une fois compris : les utilisateurs reconnaissent l'intérêt d'une visualisation instantanée de leur consommation.
- Pour les personnes daltoniennes, les couleurs peuvent être confondues : il serait pertinent d'accentuer la distinction par d'autres paramètres visuels (par exemple la fréquence de clignotement, déjà implémentée et facilement adaptable).
- Adapter la couleur orange de la LED pour qu'elle se dénote plus de la couleur verte.

6.2. Impact émotionnel négatif sans possibilité de récupération

Même si tous les participants ne l'ont pas exprimé explicitement, il est apparu clairement qu'un mauvais état prolongé de la fleur (fanaison élevée) aurait un impact émotionnel négatif important, pouvant conduire à un découragement ou à un désengagement vis-à-vis de l'objet.

Je recommande de mettre en place un mécanisme de récupération permettant à la fleur de retrouver un état plus positif.

La solution la plus pertinente serait de tirer parti du service web complémentaire pour intégrer un système de "bonnes actions" permettant à l'utilisateur de redonner de la "santé" à sa fleur.

Comme l'a souligné un participant : lorsqu'une fleur va mal, on a envie de l'arroser pour qu'elle aille mieux. Ce principe pourrait se traduire par des défis ou objectifs concrets, par exemple :

- Ne pas consulter les réseaux sociaux pendant une période définie.
- Choisir une activité physique (ex. marcher) au lieu de regarder une vidéo.
- Lire un article informatif sur les bonnes pratiques numériques.
- Trier et supprimer ses e-mails.
- Se désinscrire d'une newsletter inutile.

Ce mécanisme introduirait une dynamique positive dans l'expérience utilisateur, transformant une perception potentiellement démotivante en opportunité de progression et de sensibilisation active.

6.3. Fanaison trop abrupt et décalage avec les données

Les participants ont tous réagi très fortement à la baisse rapide de la fleur (fanaison), confirmant un impact émotionnel intense. Plusieurs se sont également montrés surpris que la fleur réagisse dès les premières consommations hebdomadaires, ce qui peut donner une impression de sévérité excessive dès le début de la semaine.

Je recommande d'ajuster l'échelle de fanaison afin que la dégradation visuelle soit moins importante dans les premiers pourcentages de consommation hebdomadaire.

Une courbe logarithmique semble être une approche pertinente et justifiée. La dégradation serait progressive au départ, puis plus marquée à mesure que la consommation se rapproche du seuil fixé.

Il serait également possible d'introduire un second seuil, par exemple en paramétrant la logique de fanaison de sorte qu'elle ne s'active qu'après avoir atteint 80 % des données hebdomadaires consommées. Cette approche permettrait de limiter la perception d'alerte prématurée tout en conservant un impact visuel fort lorsque la consommation devient réellement préoccupante.

6.4. Incohérence perçue dans l'alimentation de l'objet

Bien que la question de l'alimentation n'ait pas été prévue dans ce test, elle a été intégrée suite aux discussions lors du premier test utilisateur. Les retours recueillis sont similaires : un dispositif branché sur secteur est perçu comme consommant beaucoup d'énergie, tandis qu'un dispositif sur batterie donne l'impression de consommer peu, même si, en réalité, la fabrication et l'usage d'une batterie impliquent une énergie grise importante.

Un participant a néanmoins souligné qu'une alimentation sur secteur lui semblerait plus pratique, car elle supprimerait la nécessité de recharger et donc le risque d'oubli.

Il ressort également que plus l'autonomie sur batterie est longue, plus les utilisateurs estiment que la consommation est faible (perception alignée sur la réalité). Actuellement, la plante sort de son mode veille toutes les 1 minute, ce qui devrait lui permettre de fonctionner environ 100 heures par charge. En espaçant les cycles de réveil à 5 minutes, on multiplierait l'autonomie par 5, atteignant environ 500 heures, soit près de 21 jours. Un participant a indiqué que 2 semaines à plusieurs mois d'autonomie seraient idéals.

Cependant, il faut garder à l'esprit que la LED ne peut fonctionner que lorsque la plante est réveillée. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre la fréquence des signaux lumineux et l'autonomie de la batterie. Par exemple, un dispositif sans LED pourrait espacer les réveils à 30 minutes, ce qui porterait l'autonomie à environ 125 jours. Ces calculs restent approximatifs, mais ils illustrent l'importance de mener des tests précis de consommation énergétique afin d'optimiser ce compromis.

Recommandation :

- Réaliser des mesures précises de consommation pour déterminer les cycles de réveil optimaux.
- Évaluer deux configurations : une version à LED avec un compromis visibilité/autonomie et une version sans LED pour maximiser l'autonomie.

7. Conclusion

Ce test utilisateur a permis d'évaluer le prototype tangible dans des conditions proches de l'usage réel et de valider en grande partie les hypothèses formulées au démarrage du projet. L'analyse croisée des données quantitatives (SEQ, SUS, UEQ) et qualitatives met en évidence un produit globalement bien reçu : clair, original, engageant et porteur d'un fort potentiel émotionnel.

Les résultats montrent toutefois plusieurs axes d'amélioration prioritaires :

- La LED qui, bien que visuellement attractive, nécessite des ajustements pour renforcer sa compréhension, son accessibilité et sa pertinence d'usage.
- Un impact émotionnel fort mais parfois trop négatif, en l'absence de mécanisme de récupération, pouvant conduire à un découragement sur le long terme.
- Une échelle de fanaison jugée trop abrupte et parfois incohérente avec les données de consommation, nécessitant un calibrage plus progressif.
- Des perceptions contradictoires quant à l'alimentation de l'objet, soulevant la question de la crédibilité écologique et de l'optimisation de l'autonomie.

Ces enseignements constituent une base solide pour orienter les prochaines étapes de conception et de développement. Les recommandations formulées visent à améliorer la lisibilité des signaux, renforcer la motivation sur la durée, aligner plus finement le feedback visuel avec la consommation réelle et optimiser l'alimentation.

En intégrant ces ajustements, le dispositif pourrait non seulement conserver son attractivité initiale, mais aussi renforcer son rôle de levier comportemental en matière de sensibilisation à l'impact environnemental du numérique. Ce test met en lumière l'importance d'un équilibre précis entre esthétique, pertinence fonctionnelle et durabilité, garantissant ainsi une adoption et un usage durables.

7.1. Ouverture

Les perspectives de développement s'orientent vers la réalisation de nouveaux tests utilisateurs centrés sur les points critiques identifiés, notamment la LED, l'échelle de fanaison et l'optimisation énergétique. Des expérimentations en conditions réelles, sur une période prolongée, permettront de mieux comprendre l'évolution de l'engagement et l'efficacité comportementale du dispositif sur le long terme.

Par ailleurs, l'intégration du service web complémentaire ouvre des opportunités d'interactions plus riches, notamment par la mise en place de défis, d'objectifs personnalisés et de systèmes de récompenses. À terme, ces évolutions pourraient positionner le dispositif comme un outil complet de sensibilisation et d'accompagnement vers une consommation numérique plus responsable.

8. Bibliographie

1. HEIG-VD. Media Engineering Institute - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/instituts/mei/>
2. NIELSEN, Jakob. *Usability engineering*. . Boston : Academic Press, 1993. ISBN 978-0-12-518406-9. 005.1
3. BANGOR, Aaron, KORTUM, Philip et MILLER, James. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. . 2009. Vol. 4, n° 3.
4. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Applying the User Experience Questionnaire (UEQ) in Different Evaluation Scenarios. In : MARCUS, Aaron (éd.), *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience*. [en ligne]. Cham : Springer International Publishing, 2014. pp. 383-392. Lecture Notes in Computer Science. [Consulté le 1 août 2025]. ISBN 978-3-319-07667-6.
5. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 4, n° 6, pp. 103. DOI 10.9781/ijimai.2017.09.001.
6. SCHREPP, Martin, HINDERKS, Andreas et THOMASCHEWSKI, Jörg. Construction of a Benchmark for the User Experience Questionnaire (UEQ). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 4, n° 4, pp. 40. DOI 10.9781/ijimai.2017.445.
7. HINDERKS, Andreas, SCHREPP, Martin, DOMÍNGUEZ MAYO, Francisco José, ESCALONA, María José et THOMASCHEWSKI, Jörg. Developing a UX KPI based on the user experience questionnaire. *Computer Standards & Interfaces*. juillet 2019. Vol. 65, pp. 38-44. DOI 10.1016/j.csi.2019.01.007.
8. BROOKE, John. SUS: A 'quick and dirty' usability scale. . 1996. pp. 7.
9. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
10. FOGG, Brian Jeffrey. Fogg Behavior Model - BJ Fogg. *Fogg Behavior Model*. [en ligne]. 2025. [Consulté le 7 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.behaviormodel.org>

Annexe 19

Pré-étude

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Pré-étude du Travail de Bachelor présentant le contexte, la problématique et une recherche documentaire sur les leviers comportementaux, la data visualisation et les interfaces tangibles. L'analyse comprend un benchmark de solutions existantes et une étude de base de données. Un workshop a permis d'idéer et d'explorer plusieurs concepts. Les besoins, les objectifs et l'organisation de la suite du Travail de Bachelor sont définis.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 25 juin 2025

(Version corrigée suite à l'évaluation de la pré-étude)

Authentification

Le soussigné, atteste par la présente avoir réalisé seul ce travail et n'avoir utilisé aucune autre source que celles expressément mentionnées.

Jérémy Martin

Signature



Yverdon-les-Bains, le 23 mai 2025

Mention de relecture

Ce travail a été revu au niveau de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe par ChatGPT.

Table des matières

1. Présentation de l'entreprise et du secteur d'activité	9
1.1. CarbonViz	9
1.2. CarbonViz Home & Carbovirium	11
2. Présentation de la problématique	13
3. Synthèse de recherche documentaire	13
3.1. Levier comportemental	14
3.2. Catégories de visualisation de la consommation énergétique	15
3.2.1. Visualisations statistiques	15
3.2.2. Éco-visualisations	16
3.2.3. Visualisations physiques et ambiantes	16
3.2.4. Synthèse des visualisations énergétiques	17
3.3. Data physicalization et interfaces tangibles	17
3.3.1. Interfaces tangibles	17
3.3.2. Data Physicalization vs. Interfaces Tangibles	18
3.3.3. Apport de la data physicalization et des interfaces tangibles	19
3.4. Analyse de l'existant	20
3.4.1. Matrice comparative	20
3.4.2. Conclusion du comparatif	21
3.5. Synthèse des mécanismes de conception tangible	21

3.6.	Analyse de la base de données CarbonViz Home	22
3.6.1.	Structure et contenu de la base de données	22
3.6.2.	Possibilités d'exploitation pour le prototype	23
3.6.3.	Limites et enrichissements envisagés	23
4.	Idéation	24
4.1.	Objectifs et préparation	24
4.2.	Déroulement de l'atelier	24
4.3.	Résultats de l'idéation	25
4.4.	Conclusion de l'atelier d'idéation	25
5.	Analyse et description des besoins liés à la problématique	26
5.1.	Rappel du contexte du projet	26
5.2.	Situation actuelle	26
5.2.1.	Avancement sur les interfaces	26
5.2.2.	Analyse de la base de données	27
5.2.3.	Résultats de l'atelier d'idéation	27
5.3.	Besoins pour la réalisation du projet	27
6.	Définition des objectifs et livrables	28
6.1.	Objectifs	28
6.2.	Livrables	28
7.	Organisation et description des tâches	29
7.1.	Méthodologie et organisation du projet	29
7.2.	Tâches	31
8.	Planning	32
9.	Gestion des risques et facteurs de succès	33
10.	Apport critique	34

11. Annexes.....	39
------------------	----

Table des figures

Figure 1 - Données et émissions de CO ₂ dans l'onglet « Historique » de l'extension CarbonViz (HEIG-VD, 2023).....	10
Figure 2 - Représentation analogique de la consommation dans l'onglet « Analogies » de l'extension CarbonViz (HEIG-VD, 2023).	10
Figure 3 - Visualisation physique de l'impact du numérique grâce à l'installation Carbovirium (HEIG-VD; Carbovirium - HEIG-VD).....	12
Figure 4 - Ce schéma illustre les trois conditions nécessaires à l'apparition d'un comportement ciblé : motivation, simplicité d'exécution et déclencheur. L'action se produit uniquement si ces trois facteurs sont réunis au même moment (Fogg, 2009).....	15
Figure 5 - Amphiro a1, afficheur connecté montrant en temps réel la température, la consommation d'eau et une visualisation symbolique (ours polaire) liée à l'impact environnemental (Tiefenbeck et al. 2016).....	16
Figure 6 - Tableau de synthèse des principaux types de visualisations énergétiques, avec leurs objectifs, avantages, limites et bonnes pratiques (18, 19).	17
Figure 7 - Tableau comparatif des principales différences entre interfaces tangibles (TUI) et data physicalization (29, 30, 33).....	19
Figure 8 - Matrice comparative de projets d'interfaces tangibles selon la nature de l'interaction (passive ou active) et la modalité de représentation (symbolique ou analytique).	20
Figure 9 - Tableau de synthèse des principaux mécanismes de conception d'interfaces tangibles lié au projet.....	21
Figure 10 - Table des flux réseau horodatés détectés dans un foyer – CarbonViz Home.	22
Figure 11 - Déroulement de l'atelier d'idéation.....	24
<i>Figure 12 - Processus itératif de conception basé sur le Research through Design (Dudo 2018, p. 24)</i>	30
Figure 13 - Tableau des tâches liées à l'interface tangible.....	31
Figure 14 - Tableau des tâches liées à l'interface digitale.....	32

Figure 15 - Tableau des tâches académiques.....	32
Figure 16 - Milestones avec échéances. Le planning détaillé est à intégrer dans les Annexes.	32
Figure 17 - Matrice Farmer des risques avant mitigation	33
Figure 18 - Matrice Farmer des risques après mitigation	33

1. Présentation de l'entreprise et du secteur d'activité

Le Media Engineering Institute (MEI) est l'un des instituts de recherche appliquée de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD). Regroupant actuellement une vingtaine de collaboratrices et collaborateurs, il mène des projets dans le domaine de l'ingénierie des médias, en lien avec les technologies numériques, les systèmes interactifs et la visualisation de données (1).

Organisé autour d'équipes interdisciplinaires, le MEI s'appuie sur des expertises variées en ingénierie des médias, programmation, UX design et visualisation interactive. Cette organisation lui permet d'accompagner efficacement des partenaires externes issus du monde industriel ou institutionnel (1).

Parmi ses nombreux projets, le MEI a développé *Carbovirium* et *CarbonViz*, des initiatives destinées à sensibiliser le public à l'impact environnemental des usages numériques, notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités en ligne (2, 3).

1.1. CarbonViz

CarbonViz est un projet de recherche appliquée mené par le MEI. Le projet s'inscrit dans une volonté de sensibilisation à la consommation énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre (GES) générées par les activités en ligne. Il vise à combler le déficit de compréhension des conséquences indirectes de services numériques apparemment immatériels.

Le résultat du projet est une extension pour navigateur gratuite et open source, qui permet à tout utilisateur de visualiser en temps réel l'impact environnemental de sa navigation web. Cette extension analyse les données dans le navigateur, estime la consommation énergétique associée et la traduit en équivalent d'émissions de CO₂ (CO₂-eq). Elle repose sur un modèle de calcul transparent, spécifiquement développé pour le contexte suisse, en tenant compte du cycle de vie des équipements, du réseau et de la production d'électricité (2).

L'interface de l'extension se présente sous la forme d'un tableau de bord accessible via un onglet du navigateur ou un overlay. L'utilisateur peut y explorer plusieurs vues :

- **Historique**
Affiche, jour par jour, la quantité de données transférées et les émissions de CO₂ générées. Les données sont visualisables à l'échelle journalière, hebdomadaire ou mensuelle, sous forme de graphiques comparatifs.
- **Analogies**
Traduit l'impact de la consommation numérique en équivalents concrets de la vie quotidienne. Par exemple : nombre de marathons courus, dictionnaires imprimés ou litres d'eau bouillie. Ces analogies visent à rendre les chiffres plus parlants.
- **Tendances**
Présente l'évolution de la consommation de données et de CO₂ sur les 7 et 30 derniers jours. Des graphiques détaillent la répartition par service (ex. : Netflix, Google) et distinguent l'énergie liée au réseau de celle liée à l'ordinateur. L'onglet propose également des recommandations concrètes

pour réduire son impact numérique (ex. : réduire la résolution vidéo, désactiver la lecture automatique).

- **FAQ**

Donne des explications sur le fonctionnement de l'extension, le voyage physique des données internet, les enjeux environnementaux du numérique, ainsi que les choix méthodologiques du modèle de calcul utilisé par CarbonViz.

- **Paramètres**

Permet de personnaliser certains éléments du calcul, comme la durée de vie estimée de son ordinateur. L'utilisateur peut également télécharger ou supprimer localement les données enregistrées, et configurer l'affichage de l'extension dans le navigateur.

- **Partenaires**

Présente les partenaires institutionnels et industriels du projet (Innosuisse, HEIG-VD, Équiwatt, Services industriels de Lausanne), ainsi que les membres de l'équipe projet (développement, design, modélisation).

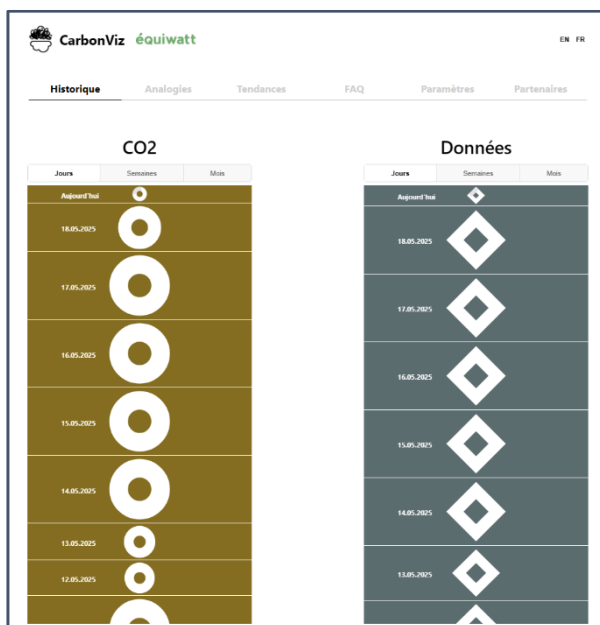


Figure 1 - Données et émissions de CO₂ dans l'onglet « Historique » de l'extension CarbonViz (HEIG-VD, 2023).

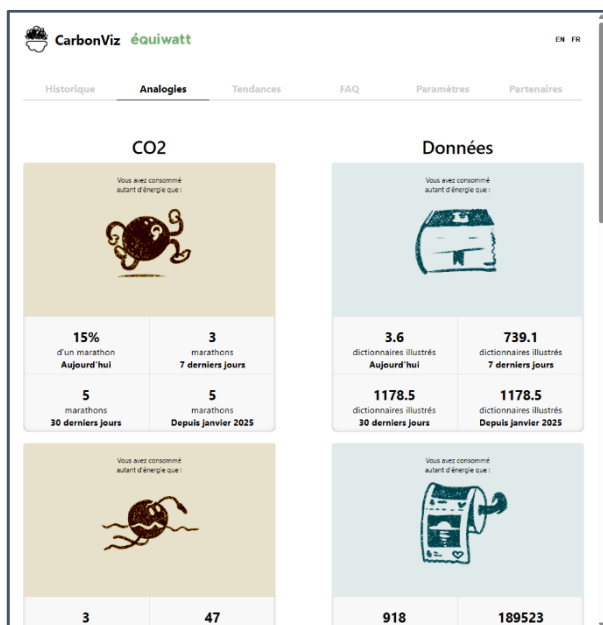


Figure 2 - Représentation analogique de la consommation dans l'onglet « Analogies » de l'extension CarbonViz (HEIG-VD, 2023).

Le modèle de calcul CarbonViz repose sur une approche par analyse du cycle de vie (ACV), intégrant les consommations directes et indirectes liées aux services numériques. Il s'appuie sur des sources reconnues telles que la base de données Ecoinvent et des publications de Cisco, de l'IEA et de chercheurs spécialisés. Le calcul prend en compte de nombreux paramètres, comme le type d'ordinateur, la durée de vie des équipements, l'origine de l'électricité (standard ou 100 % renouvelable), et la quantité de données transférées (4).

Les données traitées par l'extension restent entièrement locales. Aucune synchronisation avec un serveur externe n'est effectuée, garantissant ainsi la confidentialité des utilisateurs. L'outil vise une sensibilisation sans jugement, en fournissant des informations accessibles, contextualisées et basées sur des données scientifiques.

CarbonViz propose ainsi un outil pédagogique accessible pour mieux comprendre et visualiser les impacts invisibles de nos usages numériques quotidiens.

1.2. CarbonViz Home & Carbovirium

CarbonViz Home est un projet de recherche appliquée piloté par le MEI, en collaboration avec l'institut REDS (Reconfigurable & Embedded Digital Systems) de la HEIG-VD. Son objectif est de rendre visible l'impact environnemental des activités numériques dans les foyers, en fournissant des données concrètes sur les volumes de données échangés et leurs effets indirects sur les émissions de gaz à effet de serre (3).

Le dispositif central du projet repose sur une box Internet autonome installée chez les participant·e·s pendant quatre semaines. Celle-ci agit comme point d'accès principal au réseau domestique et enregistre les flux réseau de l'ensemble des appareils connectés (ordinateurs, téléviseurs, téléphones, objets connectés, etc.). L'analyse repose sur la bibliothèque open source nDPI (5), capable d'identifier les services utilisés même lorsque le trafic est chiffré. Le système garantit la confidentialité des données. Aucune information personnelle n'est transmise à des serveurs externes, et les données sont stockées localement (6).

L'étude s'est déroulée auprès de six foyers représentatifs de profils socio-démographiques variés (couples avec enfants, personnes seules, colocations). Les résultats, accessibles publiquement, montrent une forte concentration du trafic autour de quelques grands services. Les huit plus grandes marques (Meta, Google, Amazon, etc.) génèrent à elles seules jusqu'à 87 % du trafic entrant. En moyenne, le streaming et les réseaux sociaux représentent de 28 % à 72 % du trafic, avec des pics de consommation atteignant 25 Go par jour dans les foyers familiaux le week-end (6, 7).

En complément du dispositif de mesure, deux interfaces de visualisation ont été développées pour restituer les données de manière compréhensible et engageante. La première prend la forme d'un site web interactif (<https://carbonviz.heig-vd.ch/carbovirium/fr/>). L'utilisateur peut y consulter des graphiques dynamiques présentant la consommation de données par foyer, la répartition par catégorie d'usage, ainsi que des comparaisons entre jours ouvrés et week-ends (7).

La seconde interface, appelée Carbovirium, est une installation artistique conçue pour traduire l'impact environnemental du numérique dans un langage sensible et spatial. Elle est composée de plusieurs ampoules en verre, chacune associée à une catégorie d'activité (streaming, réseaux sociaux, navigation web, etc.). De la fumée colorée est injectée dans chaque ampoule pour représenter l'intensité de la consommation. Plus l'activité est énergivore, plus la fumée est dense.

L'installation traduit les données collectées dans les foyers en un dispositif physique. Elle combine des éléments concrets comme la fumée, la couleur et la transparence du verre pour rendre visibles des données habituellement abstraites. Elle permet une lecture intuitive de l'impact du numérique et vise à toucher un public large, sans expertise technique.



Figure 3 - Visualisation physique de l'impact du numérique grâce à l'installation Carbovirium (HEIG-VD; Carbovirium - HEIG-VD).

Carbovirium a été présentée au Geneva International Film Festival (GIFF) (8), dans le cadre du programme Création numérique de la RTS (9), ainsi que dans plusieurs événements publics organisés par la HEIG-VD (10, 11).

En combinant une interface web accessible avec une installation tangible immersive, le projet CarbonViz Home illustre la complémentarité entre analyse scientifique, design centré utilisateur et médiation artistique. Cette approche renforce l'efficacité de la sensibilisation à l'impact invisible du numérique dans la vie quotidienne.

2. Présentation de la problématique

Le numérique occupe une place centrale dans les foyers suisses. Les ménages utilisent quotidiennement divers appareils numériques pour communiquer, travailler ou se divertir. Cette situation entraîne une consommation importante d'énergie, difficile à percevoir par les utilisateurs.

En Suisse, environ 8 % de la consommation d'électricité nationale est liée aux technologies numériques. Près de la moitié de cette consommation est attribuée aux centres de données et aux réseaux de télécommunication, l'autre moitié étant due aux équipements des utilisateurs finaux (12). À l'échelle mondiale, les technologies numériques représentent actuellement entre 3 et 4 % des émissions globales de GES, un chiffre susceptible de doubler, voire tripler d'ici 2030 si l'on poursuit avec la croissance des usages actuels (13). Si la répartition de la consommation électrique est relativement équilibrée, les impacts environnementaux globaux sont, quant à eux, majoritairement liés à la fabrication des appareils des utilisateurs. Celle-ci mobilise d'importantes ressources et génère des émissions tout au long du cycle de vie des équipements (14).

Malgré ces chiffres préoccupants, la consommation énergétique du numérique reste invisible pour la plupart des utilisateurs. Regarder des vidéos, utiliser des réseaux sociaux ou sauvegarder des données en ligne semblent des gestes anodins. Pourtant, ces activités mobilisent une infrastructure complexe et énergivore. Cette invisibilité empêche une prise de conscience efficace des impacts réels des pratiques numériques (12).

Rendre visible une consommation numérique souvent perçue comme immatérielle apparaît aujourd'hui comme un levier essentiel de sensibilisation. La visualisation de données énergétiques, lorsqu'elle est claire et contextualisée, permet de mieux comprendre les effets indirects de nos usages. Intégrée dans une approche de sensibilisation, elle peut encourager des comportements plus sobres à travers des mécanismes d'incitation douce.

Ce projet s'inscrit dans cette logique. Il vise à concevoir une interface tangible qui permettra aux habitant-e-s d'un foyer de visualiser concrètement l'impact énergétique de leurs activités numériques. L'outil s'appuie sur des données réelles issues du projet de recherche CarbonViz Home, et a pour ambition de susciter une prise de conscience durable, fondée sur la compréhension de ses propres usages numériques.

3. Synthèse de recherche documentaire

Ce chapitre présente les résultats de la recherche documentaire. Celle-ci s'est articulée autour de quatre axes principaux. Le premier porte sur les principes du nudging et de l'eco-feedback. Le deuxième concerne les techniques de visualisation des données énergétiques. Le troisième explore les interfaces tangibles et les dispositifs de data physicalization. Enfin, le dernier axe se concentre sur l'analyse des solutions existantes et des données disponibles via la base de données (DB - Database) CarbonViz Home. L'objectif est d'identifier les approches pertinentes et d'évaluer leur potentiel pour sensibiliser les usagers à l'impact environnemental du numérique.

3.1. Levier comportemental

Pour encourager des usages numériques plus sobres, certaines approches visent à influencer les comportements sans imposer de contraintes. C'est l'objectif du nudging, un concept popularisé par Thaler et Sunstein (15). Il s'agit de modifier subtilement l'environnement de décision pour orienter l'action, tout en laissant à l'utilisateur sa liberté de choix. Ce type d'approche agit sur le système intuitif plutôt que sur une réflexion rationnelle (15).

Plusieurs types de nudges sont utilisés dans le domaine de l'énergie. Un exemple courant repose sur la **norme sociale** : si une personne apprend que ses voisins consomment moins qu'elle, elle aura tendance à réduire sa consommation. Ce principe a été testé dans plusieurs études, dont celle de Schultz et al. (16). Les ménages recevaient des factures comparant leur consommation à celle de foyers similaires. Résultat : les plus gros consommateurs réduisaient leur usage. Toutefois, un effet inverse apparaissait chez les ménages déjà économes, qui augmentaient légèrement leur consommation pour se rapprocher de la moyenne. Ce phénomène, appelé effet boomerang, a pu être atténué par l'ajout d'un simple smiley positif indiquant que leur comportement était exemplaire.

D'autres formes de nudges incluent :

- Les comparaisons de **référence** : montrer à quoi une quantité d'énergie correspond concrètement (ex. : une douche chaude, un trajet en voiture).
- L'amorçage **contextuel** : modifier l'ambiance ou le cadre d'un choix (ex. : éclairage, sons, messages visuels).
- Le **retour immédiat** : rendre visible une conséquence dès qu'un comportement a lieu (ex. : une lumière qui change de couleur selon la consommation).

Le modèle comportemental de B.J. Fogg complète ces approches en définissant trois conditions pour qu'un comportement ciblé se produise : la motivation, la capacité et le déclencheur (17). Si l'une de ces conditions manque, l'action échoue.

- La **motivation** repose sur trois leviers : le plaisir ou la douleur, l'espoir ou la peur, et le besoin d'acceptation sociale.
- La **capacité** dépend de la simplicité de l'action. Plus une tâche est rapide, intuitive et peu coûteuse (en temps, effort ou argent), plus elle est susceptible d'être réalisée.
- Le **déclencheur** est ce qui pousse à agir au bon moment. Il peut prendre la forme d'un signal visuel, d'un rappel ou d'un stimulus physique. Il n'est efficace que si la motivation et la capacité sont présentes au même moment.

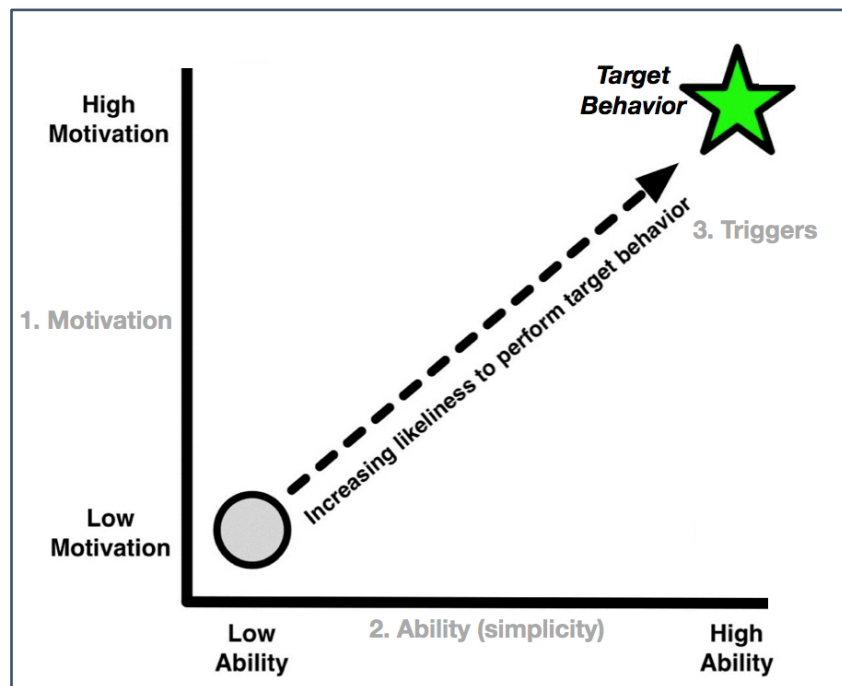


Figure 4 - Ce schéma illustre les trois conditions nécessaires à l'apparition d'un comportement ciblé : motivation, simplicité d'exécution et déclencheur. L'action se produit uniquement si ces trois facteurs sont réunis au même moment (Fogg, 2009).

Ce modèle souligne un point essentiel : simplifier l'action est souvent plus efficace que de vouloir renforcer la motivation. Dans le cadre de ce projet, cela implique de concevoir une interface facile à comprendre, discrète mais perceptible, et intégrée aux routines du foyer.

Ces deux approches, nudging et modèle de Fogg, offrent un cadre utile pour concevoir une visualisation tangible qui incite sans contraindre. Pour cela, elle doit combiner un feedback immédiat, des signaux visuels simples et une compréhension intuitive des conséquences liées aux usages numériques.

3.2. Catégories de visualisation de la consommation énergétique

Concevoir une visualisation de l'impact énergétique ne relève pas d'un choix purement esthétique ou technologique. Elle doit répondre à des objectifs précis : améliorer la compréhension de la consommation et encourager des comportements plus durables. L'analyse de la littérature distingue plusieurs types de visualisations dans les systèmes d'eco-feedback. Chacune présente des effets spécifiques, des limites et des bonnes pratiques.

3.2.1. Visualisations statistiques

Les visualisations statistiques sont les plus répandues dans les systèmes d'eco-feedback. Elles permettent une lecture directe de la consommation à travers des représentations telles que les graphiques en lignes, barres, secteurs ou jauges. Leur efficacité dépend cependant fortement du contexte d'usage et du type de données à représenter.

Par exemple, les graphiques à barres sont utiles pour comparer plusieurs catégories (équipements, utilisateurs, périodes), mais deviennent difficiles à interpréter si trop de colonnes sont présentées. De même, l'usage de couleurs doit être rigoureux : couleurs douces pour l'ensemble, couleurs vives pour signaler des zones critiques (18, p. 11).

Les graphiques circulaires en secteurs sont à éviter lorsque le nombre de catégories dépasse cinq ou six, et ils sont peu adaptés à la comparaison entre tranches non contiguës (18, p. 11). À l'inverse, les jauges sont très accessibles, même pour des utilisateurs peu familiers avec les technologies, et s'avèrent utiles dans les comparaisons normatives, bien qu'elles prennent beaucoup de place et ne permettent pas l'affichage de plusieurs variables à la fois.

Enfin, les visualisations numériques (valeurs chiffrées) sont très rapides à interpréter mais peu engageantes. Elles montrent leur efficacité lorsqu'elles combinent plusieurs unités (kWh, coût, CO₂), ce qui favorise l'engagement comportemental (18, p. 12).

3.2.2. Éco-visualisations

Les éco-visualisations transforment des données abstraites en représentations métaphoriques inspirées de la nature ou du vivant. Leur objectif n'est pas tant de fournir une mesure exacte que de susciter une connexion émotionnelle avec l'utilisateur (19).

Un exemple illustrant cette technique est celui de l'ours polaire sur une banquise, dont la taille diminue avec la consommation d'eau chaude pendant une douche, comme dans le dispositif amphiro b1 (20). Ce type de visualisation agit comme un rappel et un déclencheur comportemental selon le modèle de Fogg (19).

Cependant, certaines études ont montré que les représentations littérales (comme l'ours polaire) sont moins efficaces chez les enfants que les métaphores liées à leur quotidien (un animal de compagnie, par exemple) (18, p. 21). La surcharge émotionnelle peut également engendrer un sentiment de culpabilité contre-productif. Il est donc conseillé de combiner ces représentations avec des visualisations plus traditionnelles pour s'adapter à la diversité des profils utilisateurs.



Figure 5 - Amphiro a1, afficheur connecté montrant en temps réel la température, la consommation d'eau et une visualisation symbolique (ours polaire) liée à l'impact environnemental (Tiefenbeck et al. 2016).

3.2.3. Visualisations physiques et ambiantes

Les visualisations physiques (ou ambiantes) intègrent les informations énergétiques dans l'environnement de vie. Leur principal avantage est leur présence continue et passive, qui permet un rappel fréquent et contextuel sans nécessiter d'interaction explicite.

Des prototypes comme un arbre lumineux à LED indiquant les économies d'un groupe (21), ou des prises à rétroaction lumineuse (22), ont montré leur efficacité pour stimuler l'engagement collectif.

Leur impact est renforcé lorsqu'ils sont placés dans des espaces partagés (18, p. 23). Ces dispositifs offrent une perception directe et sensorielle de la consommation. Toutefois, ils nécessitent des supports explicatifs pour en faciliter la compréhension

3.2.4. Synthèse des visualisations énergétiques

Les différentes visualisations utilisées dans les systèmes d'eco-feedback présentent des forces, des limites et des usages spécifiques. La figure suivante récapitule ces éléments selon les catégories identifiées dans la littérature scientifique.

Type de visualisation	Objectif principal	Avantages	Limites	Recommandations UX
Graphiques à barres	Comparer différentes catégories ou périodes	Bonne lisibilité pour comparaisons	Surcharge visuelle si trop de colonnes	Limiter les catégories, regrouper, hiérarchiser
Graphiques en secteurs	Visualiser la part de chaque catégorie	Visuel immédiat pour données simples	Peu lisible au-delà de 5-6 catégories	Utiliser seulement pour 3-5 catégories
Jauges (gauge charts)	Comparer la valeur d'un indicateur à une norme	Facile à comprendre pour tous publics	Occupe beaucoup d'espace	Utiliser pour comparaisons simples
Valeurs numériques (KWh, CO ₂ , CHF)	Afficher une valeur précise	Rapidité de lecture	Peu engageant seul	Combiner avec d'autres formats
Représentations métaphoriques (ex. ours polaire)	Créer un impact émotionnel	Impact symbolique fort	Risque de culpabilisation, efficacité variable	Privilégier les métaphores liées au quotidien
Visualisations physiques / ambiantes	Fournir un feedback discret dans l'environnement	Présence continue, passive, contextuelle	Compréhension parfois limitée sans légende	Toujours ajouter une légende ou une aide

Figure 6 - Tableau de synthèse des principaux types de visualisations énergétiques, avec leurs objectifs, avantages, limites et bonnes pratiques (18, 19).

3.3. Data physicalization et interfaces tangibles

Pour rendre visibles les usages numériques, deux approches complémentaires sont mobilisées : les Interfaces Utilisateur Tangibles (TUI – Tangible User Interface) et la data physicalization. Les premières permettent d'interagir avec des données via des objets physiques ; les secondes les traduisent en formes matérielles perceptibles. Ces dispositifs offrent des leviers efficaces de sensibilisation, en particulier dans des contextes quotidiens.

3.3.1. Interfaces tangibles

Les TUIs, théorisées par Ishii et Ullmer (23), visent à "rendre les bits tangibles" en permettant à l'utilisateur de manipuler directement des objets physiques pour interagir avec des données numériques. Contrairement aux interfaces graphiques traditionnelles (WIMP - Windows, Icons, Menus, Pointer), les TUIs mobilisent le corps, les gestes, et l'environnement physique pour enrichir la relation entre humain et machine (23, 24).

Trois caractéristiques principales définissent une TUI efficace (24, 25) :

- Un **retour sensoriel tangible** : l'objet encode physiquement une information à travers sa forme, sa lumière ou son mouvement.
- Une **manipulation intuitive** : les gestes tels que tourner, pousser ou tirer déclenchent des actions claires.
- Un **couplage fort entre l'objet et sa fonction** : l'utilisateur comprend immédiatement le rôle de l'objet grâce à sa forme ou sa matière, un principe nommé *embodiment*.

Dans le domaine de la visualisation énergétique, les TUI permettent de matérialiser des informations abstraites comme le trafic ou les pics de consommation de réseaux électrique. Plusieurs projets expérimentaux montrent qu'un objet physique affichant la consommation via des signaux visuels ou mécaniques (par exemple une colonne qui s'élève ou une lumière qui change) favorise la compréhension et l'engagement (Shaer & Hornecker, 2022 ; Krestanova et al., 2021 ; Rist & Masoodian, 2019).

Les travaux de Tan et al. (26) sur la *calm technology* prolongent cette logique : les signaux transmis par la TUI doivent rester discrets, intégrés à l'environnement, et exploitables en périphérie de l'attention. Une variation douce de lumière ou une vibration subtile peuvent suffire à informer sans perturber. Ce type de feedback favorise une *épaisseur temporelle* : l'information reste présente, mais n'interrompt pas.

La conception d'une TUI soulève cependant plusieurs défis. Du point de vue de l'ingénierie, elle requiert une expertise en électronique embarquée, en fabrication et en communication de données. Du point de vue de l'UX, son évaluation nécessite des outils adaptés : *observation in situ*, *entretiens*, ou encore *AttrakDiff*, une méthode qui évalue l'attractivité et la qualité hédonique d'un dispositif (27). L'interaction étant souvent collective ou multisensorielle, ces méthodes doivent aussi prendre en compte le contexte social et corporel des usagers. Enfin, plusieurs limites pratiques subsistent : coût élevé des prototypes, faible scalabilité, difficulté de fabrication, et compréhension immédiate parfois insuffisante sans accompagnement visuel ou explicatif.

Dans une optique d'éco-conception, les TUI peuvent être conçues avec un minimum d'électronique, en déléguant le traitement des données à une webapp. L'objet devient alors un simple afficheur physique, ce qui réduit sa consommation énergétique. Certains auteurs comme Bell et al. (28) explorent également l'usage de biomatériaux (ex. gélatine, fibre, argile biodégradable) pour construire des objets interactifs respectueux de l'environnement.

3.3.2. Data Physicalization vs. Interfaces Tangibles

Bien que proches en apparence, les concepts de data physicalization et de TUI répondent à des logiques distinctes. La data physicalization consiste à matérialiser des données abstraites dans des objets physiques conçus pour la perception, l'interprétation ou la discussion, sans interaction systématique attendue (29, 30).

Autrement dit, les TUIs sont orientées vers l'action (input/output), alors que la data physicalization se concentre sur la représentation (output). Dans le premier cas, l'utilisateur agit. Dans le second, il observe ou interprète. Les objets tangibles ne représentent pas toujours la donnée ; les artefacts de physicalization, eux, incarnent directement cette donnée dans leur forme, couleur ou mouvement (25, 31).

Cette distinction se reflète également dans les technologies mobilisées. Les TUIs s'appuient souvent sur des capteurs (RFID, infrarouge, accéléromètres, etc.) ou de la vision par ordinateur (CV - Computer vision) pour permettre la manipulation en temps réel (32). Les artefacts de data physicalization peuvent être analogiques, comme ceux reposant sur l'impression 3D ou sur des matériaux capables de réagir physiquement à des stimuli externes (ex. chaleur, lumière, humidité), ou motorisés, mais leur interactivité est généralement plus faible, voire absente (29).

Certains projets hybrides brouillent cependant cette frontière. Par exemple, ReacTable associe des objets tangibles à des retours visuels en temps réel (24), tandis que le projet Cairn transforme des blocs de données manipulés collectivement en visualisation sculpturale (33). Ce chevauchement montre que ces approches ne sont pas mutuellement exclusives, mais complémentaires : dans un projet de sensibilisation à la consommation numérique, une interface pourrait combiner l'interactivité d'une TUI et la force expressive d'une data physicalization.

3.3.2.1. Synthèse comparative

Axe	TUI	Data Physicalization
Finalité	Contrôler un système	Représenter des données
Nature de l'objet	Interface tangible	Donnée tangibilisée
Rôle de l'utilisateur	Acteur, manipulateur	Lecteur, parfois contributeur
Interactivité	Forte, bidirectionnelle	Parfois absente, unidirectionnelle
Domaine disciplinaire	HCI, interaction, ergonomie	Visualisation, design, muséographie
Temporalité	En temps réel, interactif	Souvent persistante, mémorisable
Techniques	Capteurs, actuateurs, RFID, computer vision	Impression 3D, matières, lumière, volume

Figure 7 - Tableau comparatif des principales différences entre interfaces tangibles (TUI) et data physicalization (29, 30, 33).

3.3.3. Apport de la data physicalization et des interfaces tangibles

Les TUIs et la data physicalization permettent de rendre visibles et compréhensibles les usages numériques via des formes physiques, lumineuses ou mécaniques. Leur présence discrète dans l'environnement domestique favorise une sensibilisation intuitive, souvent plus engageante que les visualisations classiques.

Conçues pour interpeller sans contraindre, ces interfaces déclenchent une prise de conscience sensorielle. Cependant, ces dispositifs présentent des limites. Ils offrent peu d'accès à des données détaillées et ne s'adaptent pas aux besoins spécifiques de chaque utilisateur.

3.4. Analyse de l'existant

Pour comparer les projets existants, deux axes clés ont été définis :

- **Axe horizontal** : Nature de l'interaction (Passive ↔ Active)
Cet axe distingue les projets selon le degré d'interaction proposé aux utilisateurs.
- **Axe vertical** : Modalité de représentation (Symbolique ↔ Analytique)
Cet axe évalue si les projets utilisent une représentation métaphorique (intuitive et émotionnelle) ou analytique (explicite et précise).

3.4.1. Matrice comparative

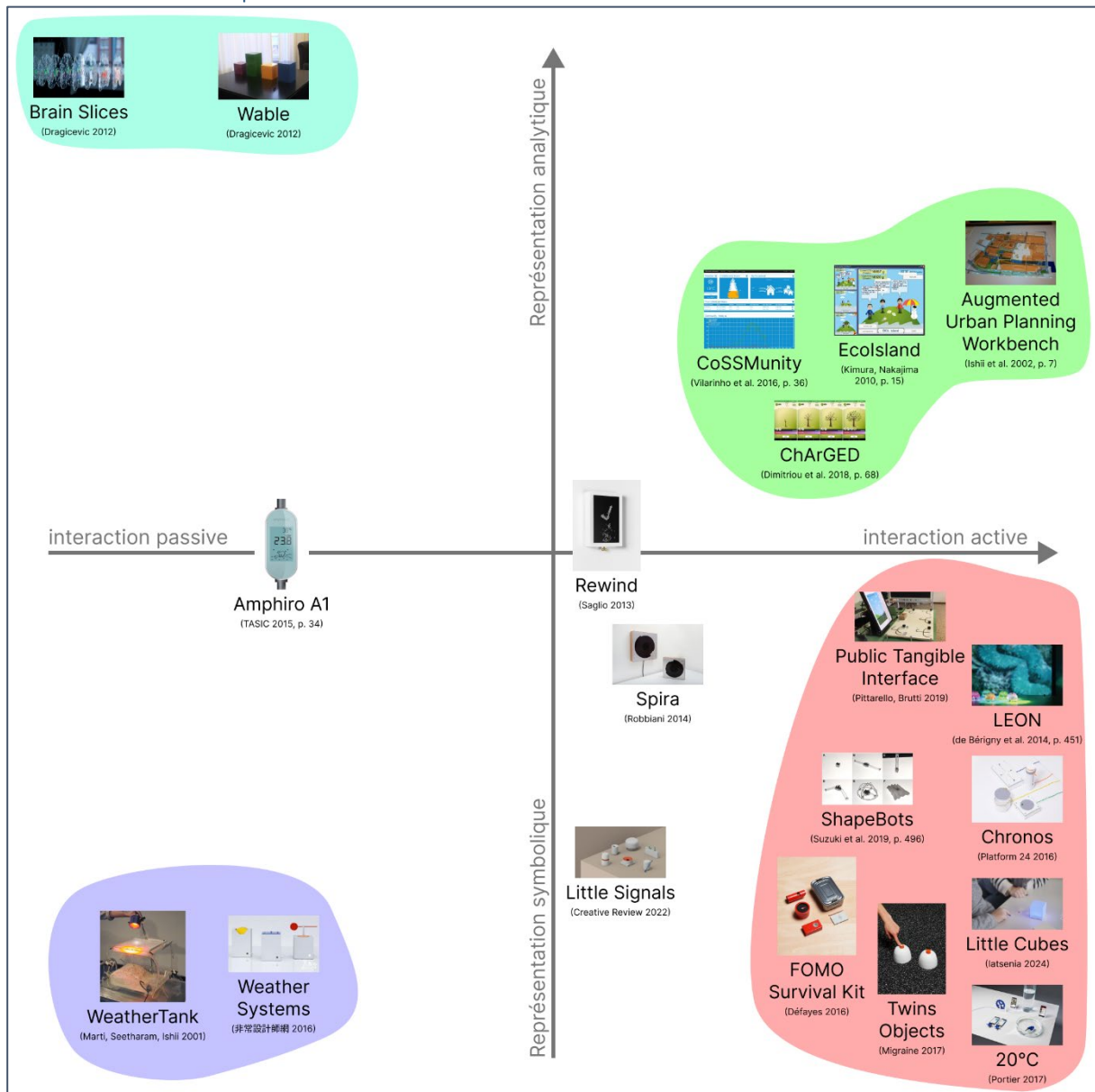


Figure 8 - Matrice comparative de projets d'interfaces tangibles selon la nature de l'interaction (passive ou active) et la modalité de représentation (symbolique ou analytique).

3.4.2. Conclusion du comparatif

La matrice comparative met en lumière deux approches complémentaires.

La première concerne les interfaces tangibles à représentation symbolique, situées dans la partie basse de la matrice (clusters rouge et violet). Ces objets traduisent les données sous forme de signaux simples et intuitifs permettant une compréhension rapide sans effort d'analyse. Intégrées dans l'environnement quotidien, ils fonctionnent en périphérie de l'attention et diffusent un message constant sans perturber.

La seconde approche, cluster vert en haut à droite de la matrice, repose sur des interfaces digitales plus analytiques. Elles ne se limitent pas à des chiffres complexes, mais visent à rendre les données compréhensibles et motivantes. L'usage combiné de visualisations statistiques et d'éco-visualisations permet une lecture claire et engageante. La gamification peut renforcer l'envie d'explorer, de comparer et de suivre ses usages dans le temps.

Ces deux approches se complètent. L'interface tangible capte l'attention et transmet un message clair. L'interface digitale approfondit la compréhension et soutient l'analyse. L'une déclenche la prise de conscience, l'autre accompagne la réflexion. Ensemble, elles créent une expérience cohérente, accessible et durable.

3.5. Synthèse des mécanismes de conception tangible

Mécanisme	Modalité	Effet recherché	Conditions d'efficacité
Feedback lumineux	Visuel	Notification, alerte douce	Doit être perceptible mais non intrusive
Feedback sonore	Auditif	Renforcement de l'action	Doit être contextualisée
Feedback haptique	Tactile	Renforcement sensoriel, feedback	Doit répondre à l'action
Changement de forme	Physique	Curiosité, engagement	Compréhensible et réversible
Changement de position	Mécanique	Changement d'état lisible	Doit exprimer un état logique
Manipulation directe	Gestuelle tangible	Contrôle naturel	Affordance claire et feedback immédiat
Affordance physique	Perceptive	Utilisation intuitive	Forme et matière adaptées
Symbolique environnementale	Contextuelle	Immersion, familiarité	Liée à l'environnement d'usage
Calm technology	Périphérique	Réduction de charge cognitive	Subtil, constant, évocateur
Affichage analogique persistant	Visuelle / physique	Visibilité constante	Stable, visible dans le temps
Interaction collaborative	Sociale / spatiale	Engagement social	Usage collectif, rôle partagé

Figure 9 - Tableau de synthèse des principaux mécanismes de conception d'interfaces tangibles lié au projet.

3.6. Analyse de la base de données CarbonViz Home

Les données exploitées dans ce Travail de Bachelor proviennent de la base de données de CarbonViz Home. Elles ont été récoltées sur un mois auprès de cinq foyers suisses aux profils socio-économiques variés, via des routeurs modifiés capables de capter le trafic réseau domestique.

Cette analyse vise à comprendre la structure et les limites de ces données afin de concevoir un prototype d'interface tangible pertinent et techniquement compatible avec l'écosystème actuel de CarbonViz Home. Le projet s'adapte donc au format de données existant, garantissant un déploiement cohérent à terme.

Néanmoins, si certaines données utiles à la conception s'avèrent manquantes, elles pourront être ajoutées de manière fictive dans le cadre du TB. Cela permettra de tester des cas d'usage pertinents, en vue d'une implémentation réelle ultérieure par CarbonViz.

3.6.1. Structure et contenu de la base de données

Chaque foyer dispose d'une table unique contenant les flux réseau captés par son routeur CarbonViz Home. Ces données sont organisées sous forme d'enregistrements représentant les échanges réseau entre une adresse IP locale (`src_ip`) et une adresse distante (`dst_ip`), accompagnés de métadonnées permettant leur interprétation.

Les champs principaux sont :

flows	
123 run_id	INTEGER NOT NULL
123 flow_id	INTEGER NOT NULL
A-Z src_ip	TEXT NOT NULL
A-Z dst_ip	TEXT NOT NULL
123 dst2src_bytes	INTEGER
123 src2dst_bytes	INTEGER
A-Z proto_master	TEXT
A-Z proto_app	TEXT
A-Z proto_by_ip	TEXT
123 proto_master_id	INTEGER
123 proto_app_id	INTEGER
123 proto_by_ip_id	INTEGER
A-Z updated	TEXT
123 category_id	INTEGER
A-Z category	TEXT

Figure 10 - Table des flux réseau horodatés détectés dans un foyer – CarbonViz Home.

- **src_ip, dst_ip**
adresses IP source et destination
- **src2dst_bytes, dst2src_bytes**
volume de données échangées dans chaque direction
- **proto_app_id, proto_app**
protocole applicatif (ex. : YouTube, WhatsApp)
- **category_id, category**
catégorie d'usage (streaming, social, navigation, etc.)
- **updated**
horodatage de la mesure
- **flow_id, run_id**
identifiants techniques
- **proto_by_ip, proto_by_ip_id, proto_master, proto_master_id**
métadonnées liées à la détection des protocoles réseau

Cette structure centralisée permet d'associer les données à un foyer spécifique tout en conservant une lecture complète et horodatée des usages. Les champs de protocole applicatif (`proto_app`) et de

catégorie d'usage (*category*) facilitent l'agrégation par type de service, ce qui sera essentiel pour visualiser l'impact énergétique des différents usages numériques.

3.6.2. Possibilités d'exploitation pour le prototype

Les données disponibles offrent une base solide pour concevoir une interface tangible qui représente de manière claire et dynamique les usages numériques du foyer. En regroupant les flux par catégorie (*category*) et en analysant les volumes échangés (*src2dst_bytes*, *dst2src_bytes*), il est possible d'identifier les usages les plus gourmands en données, et donc potentiellement les plus énergivores.

Ces informations permettront de faire émerger visuellement les types d'usage dominants (ex. streaming, réseaux sociaux, navigation) à travers une représentation physique, par exemple à l'aide de modules lumineux, de variations de forme ou de couleur, ou d'autres signaux sensoriels.

L'horodatage (*updated*) rend également possible un affichage évolutif. En inscrivant les données dans le temps, l'interface pourra refléter la consommation actuelle du foyer, alerter sur les pics d'activité, ou encore représenter la répartition des usages au fil d'une journée.

3.6.3. Limites et enrichissements envisagés

Plusieurs limites doivent être prises en compte. Les adresses IP locales (*src_ip*) ne permettent pas d'identifier de manière fiable les appareils ou utilisateurs, en raison de l'adressage dynamique (DHCP - Dynamic Host Configuration Protocol). Il est donc difficile de suivre un appareil donné sur la durée.

De plus, une part importante des données comporte des valeurs non identifiées, notamment dans les champs liés aux protocoles réseau :

- **proto_master** : 916'818 "Unknown" sur 1'529'753 (≈ 60 %)
- **proto_by_ip** : 1'017'478 "Unknown" (≈ 67 %)
- **proto_app** : 26'371 "Unknown" (≈ 1.7 %)
- **category** : aucune valeur "Unknown"

Ces lacunes réduisent la précision de l'attribution des flux à des services spécifiques. Dans le cadre du TB, des données fictives pourront être ajoutées pour compléter certains paramètres absents. Cela permettra de tester des représentations ou scénarios pertinents. Ces ajouts devront rester compatibles avec une implémentation future par CarbonViz Home.

Par ailleurs, les données disponibles ne contiennent pas directement d'indications sur la consommation d'énergie ou les GES. L'aspect du calcul de ces impacts devra donc être pris en compte dans le cadre du projet. Il sera potentiellement possible de se baser sur la méthode utilisée par le MEI dans CarbonViz Home.

4. Idéation

Afin de faire émerger des pistes tangibles de solution dès la phase de pré-étude, un atelier d'idéation a été organisé selon une méthodologie de design thinking. Ce workshop visait à explorer différentes formes d'interfaces tangibles susceptibles de rendre perceptible l'impact énergétique du numérique dans un foyer.

4.1. Objectifs et préparation

L'atelier avait pour but de transformer des enjeux abstraits liés à la consommation numérique en propositions concrètes d'interfaces tangibles. Il s'inscrivait dans une démarche centrée utilisateur et mobilisait des outils de cadrage tels que les énoncés *Point of View* (POV) et les questions *How Might We* (HMW). Quatre profils d'utilisateurs types, construits en amont, ont structuré l'exercice :

- **Utilisateur·rice intensif·ve multi-équipé·e**
Difficulté à percevoir les conséquences de ses usages.
- **Utilisateur·rice techno-curieux·se jeune**
Sensible à l'innovation mais peu conscient de son impact écologique.
- **Utilisateur·rice modéré·e**
Motivé·e par la sobriété numérique, en quête d'outils simples et efficaces.
- **Utilisateur·rice rationnel·le ou minimaliste**
Souhaite valider l'impact réel de ses efforts.

Pour chaque profil, trois questions HMW ont été formulées, permettant d'amorcer la génération d'idées sous des angles variés : visualisation, retour d'information, engagement, gamification, etc.

4.2. Déroulement de l'atelier

L'atelier a réuni quatre étudiant·e·s en troisième année du Bachelor en Ingénierie des Médias à la HEIG-VD et s'est déroulé en présentiel selon la séquence suivante :

Temps	Activité
20 min	Introduction au projet, enjeux des TUIs et contexte environnemental
10 min	Présentation des POV et HMW
10 min	Crazy 8s : chaque participant·e esquisse 8 idées en 8 minutes (tournus de feuilles pour inspiration croisée)
10 min	Solution Sketch : développement individuel d'une idée plus aboutie
10 min	Discussion collective et vote des deux idées les plus prometteuses

Figure 11 - Déroulement de l'atelier d'idéation

Cette méthodologie rapide favorise l'émergence d'un grand nombre de concepts, tout en amorçant une première phase de sélection.

4.3. Résultats de l'idéation

L'atelier a permis de générer plusieurs concepts originaux d'interfaces tangibles, chacun explorant des stratégies différentes pour visualiser la consommation énergétique du numérique. Quatre propositions principales se sont dégagées :

- **Papillons (Odin)**
Ce concept représente la consommation mensuelle à travers un ensemble de papillons numériques ou physiques. Chaque foyer débute le mois avec un nombre fixe de papillons, symbolisant un budget énergétique. À mesure que les usages numériques augmentent, les papillons disparaissent. Cette visualisation vise à associer consommation et perte, dans une logique poétique mais explicite.
- **Tableau décoratif (Steve)**
Inspiré des principes de la calm technology, ce tableau mural offre une visualisation continue et discrète de la consommation numérique. Le dessin ou l'univers représenté évolue progressivement en fonction des données consommées. L'utilisateur ou l'utilisatrice peut personnaliser le thème initial, comme une scène naturelle, un paysage abstrait ou un intérieur domestique. En cas de consommation élevée, l'image se modifie visiblement par une dégradation, un assombrissement ou une disparition d'éléments. Le tableau agit comme un indicateur ambiant, subtil mais expressif, intégré dans l'esthétique du foyer.
- **Personnage attachant (Leila)**
Ce dispositif repose sur une tablette affichant en permanence un petit personnage dans son univers. L'état de son environnement (calme, dégradé, en feu) évolue en fonction de la consommation numérique du foyer. Inspiré des figurines Smiski, ce concept joue sur l'empathie et la narration pour renforcer l'engagement émotionnel. L'utilisateur·rice est ainsi invité·e à « prendre soin » de son personnage à travers ses propres comportements.
- **Sablier (Anthony)**
Le sablier physique matérialise la consommation énergétique sous forme de débit. Plus le foyer consomme de données numériques, plus le sable s'écoule rapidement. Une consommation modérée ralentit cet écoulement. Lorsque la quantité de données prévue est dépassée, le sablier se vide complètement et doit être retourné manuellement pour relancer la mesure. Ce seuil peut être comparé à une grandeur familière : par exemple, consommer autant d'énergie que chauffer une pizza au four. Ce geste simple incite à la prise de conscience.

Parmi les idées proposées, deux concepts ont été identifiés comme les plus pertinents à la suite d'un vote des participants :

- **Le Personnage attachant**, apprécié pour son potentiel narratif et affectif,
- **Le Sablier**, valorisé pour sa clarté métaphorique et son interactivité tangible.

4.4. Conclusion de l'atelier d'idéation

L'organisation d'un atelier d'idéation s'est révélée pertinente. Cette démarche a permis de stimuler la créativité et de générer, en un temps réduit, un éventail d'idées variées.

Deux limites ont toutefois été observées. Premièrement, les participant·e·s, des étudiant·e·s en troisième année du Bachelor en Ingénierie des Médias, n'étaient pas familiers avec la notion d'interface tangible. Malgré une introduction théorique de trente minutes, la majorité des propositions sont restées centrées sur des solutions numériques ou bidimensionnelles. Il aurait été plus pertinent d'impliquer des personnes professionnellement actives dans la conception d'interfaces physiques, comme des product designer ou des interaction designer.

Deuxièmement, les participant·e·s ne disposaient que d'une heure pour réaliser l'ensemble des étapes. Une durée d'au moins deux heures aurait permis d'approfondir les idées et de consolider les concepts esquissés.

Malgré ces contraintes, les propositions formulées offrent une base d'inspiration concrète pour la suite du projet. Le concept de personnage attachant, imaginé par Leila, en est un exemple. Bien qu'il ait été pensé sous une forme numérique, son potentiel émotionnel pourrait également fonctionner dans une version tangible. Il faudra toutefois envisager des adaptations spécifiques pour garantir la cohérence entre forme, interaction et message transmis.

5. Analyse et description des besoins liés à la problématique

5.1. Rappel du contexte du projet

La consommation d'énergie liée aux usages numériques dans les foyers reste largement invisible. Pourtant, les services en ligne mobilisent des infrastructures complexes et énergivores. Cette réalité peine à être perçue, car elle ne laisse aucune trace tangible dans le quotidien des utilisateurs.

À ce jour, il n'existe pratiquement aucun dispositif accessible qui permette aux habitant·e·s d'un foyer de visualiser concrètement l'impact de leurs activités numériques.

Ce projet a pour but de concevoir une interface tangible destinée à rendre visible la consommation numérique au sein d'un environnement domestique. Il repose sur des données de trafic internet mesurée localement dans 5 foyers de Suisse romande.

L'objectif est de susciter une prise de conscience de ses usages numériques et de leur impact.

5.2. Situation actuelle

La phase de pré-étude a permis de structurer le projet. Une recherche documentaire approfondie a été menée sur les leviers comportementaux, les systèmes de visualisation énergétique, les interfaces tangibles et les dispositifs de data physicalization. Cette exploration a permis de définir les conditions nécessaires à la conception d'une interface tangible pertinente et engageante. Un atelier d'idéation a également permis d'explorer des premières formes d'interface tangible.

5.2.1. Avancement sur les interfaces

Deux axes complémentaires ont émergé comme lignes directrices pour la suite du projet :

1. Une interface tangible basée sur les principes de la calm technology (26), afin d'être intégrée discrètement mais efficacement dans le quotidien.
2. Une interface web proposant un accès détaillé aux données. Pensée pour enrichir l'expérience via des visualisations interactives, des mécaniques de gamification et des indicateurs statistiques.

Ces deux dimensions répondent à des usages distincts. L'objet tangible s'adresse à l'attention périphérique, dans une logique de présence continue. L'interface numérique propose une lecture plus approfondie et volontaire, centrée sur la compréhension et l'engagement.

Le recours à une interface physique permet de rendre visibles des phénomènes abstraits comme la consommation numérique. En s'intégrant dans l'espace quotidien, elle attire l'attention sans perturber, grâce à des signaux subtils comme la lumière, le mouvement ou la forme. Cette présence discrète facilite la prise de conscience et stimule la curiosité. De plus, en matérialisant l'impact du numérique, l'objet encourage les échanges et les réflexions au sein du foyer. S'il est conçu de manière sobre et durable, il renforce également la cohérence éthique du projet en incarnant les valeurs qu'il défend.

5.2.2. Analyse de la base de données

L'analyse de la base de données issue du projet CarbonViz Home confirme la faisabilité technique du prototype. Les flux réseau sont horodatés et catégorisés par type d'usage, ce qui permet une représentation fidèle des habitudes numériques d'un foyer. Certaines limites, notamment liées à l'identification des services, seront prises en compte au moment du prototypage.

5.2.3. Résultats de l'atelier d'idéation

Au-delà de la recherche, un atelier d'idéation a été conduit avec des étudiant·e·s afin d'explorer différentes formes de visualisations tangibles. Cet exercice a permis de générer plusieurs pistes concrètes, qui serviront de base aux itérations futures.

5.3. Besoins pour la réalisation du projet

La réalisation d'une interface tangible et d'un prototype numérique implique des besoins spécifiques, à la fois méthodologiques, matériels et logiciels. Le projet nécessitera plusieurs phases d'itération pour tester différentes formes, interactions et représentations. Ces essais seront essentiels pour adapter l'objet à son contexte d'usage et garantir sa lisibilité.

La fabrication de l'interface pourra se faire à l'aide de matériaux simples comme du carton, du bois ou des éléments plastiques. Des outils de prototypage rapide, tels que l'impression 3D ou la découpe laser, permettront de produire des versions testables. Une version électronique pourra être envisagée selon les besoins du projet. Elle pourrait intégrer des LED, un microcontrôleur de type Arduino ou ESP32, ainsi qu'une alimentation via USB ou batterie. La modélisation des mécaniques se fera potentiellement avec des outils comme Tinkercad ou Fusion 360.

En parallèle, l'interface web nécessitera la création d'un prototype interactif sous Figma, permettant de simuler les parcours utilisateurs et les visualisations prévues, sans développement technique dans un premier temps.

6. Définition des objectifs et livrables

6.1. Objectifs

Par ordre d'importance, ce Travail de Bachelor poursuit les objectifs suivants :

- **Créer une expérience utilisateur tangible**
Concevoir une interface physique interactive, capable de transmettre une information claire et engageante au sein du foyer. Cette interface doit susciter l'attention tout en permettant une appropriation intuitive des données liées à l'impact du numérique.
- **Rendre perceptible l'impact des usages numériques**
Représenter de manière concrète les conséquences énergétiques d'activités numériques courantes (par exemple : streaming, réseaux sociaux), en s'appuyant sur les données de trafic issues du réseau domestique.
- **Favoriser un changement de comportement**
Encourager une prise de conscience et des ajustements comportementaux, en intégrant des mécanismes inspirés des théories du nudge et des leviers UX éprouvés.
- **Conceptualiser l'expérience digitale complémentaire**
Définir et maquetter une interface numérique (ex. : application ou tableau de bord) en complément de l'objet tangible. Cette extension permettra une consultation détaillée des données et une continuité de l'expérience utilisateur.

6.2. Livrables

Le projet donnera lieu aux livrables suivants :

- **Un prototype d'interface tangible fonctionnel**
Objet physique interactif, conçu avec ou sans composants électroniques, destiné à représenter visuellement l'impact énergétique du numérique. La fréquence d'actualisation des données peut être ponctuelle, selon les contraintes techniques retenues.
- **Des maquettes de l'expérience digitale complémentaire**
Interfaces illustrant le prolongement numérique de l'objet tangible. Elles permettront d'explorer différents parcours utilisateurs et de valider les choix de conception.
- **Un rapport de Travail de Bachelor**
Document structuré exposant la problématique, la méthodologie, la revue documentaire, l'analyse comparative, les étapes de conception, la réalisation du prototype et une réflexion critique sur les résultats.
- **Une affiche de présentation A4**
Synthèse visuelle du projet, conçue pour être intégrée à la brochure officielle des Travaux de Bachelor de la HEIG-VD.

7. Organisation et description des tâches

7.1. Méthodologie et organisation du projet

Le projet adopte globalement une approche de type waterfall. Pour structurer la progression du travail des phases successives de recherche, conception, prototypage, tests, et finalisation sont planifiées de manière linéaire et prédéterminée. Ce choix garantit une clarté organisationnelle et facilite la gestion temporelle du projet dans le cadre limité du Travail de Bachelor.

Cependant, la création de l'interface tangible repose sur une démarche différente. Compte tenu du caractère exploratoire et expérientiel de ce type d'interaction, une méthodologie itérative est nécessaire afin d'affiner les concepts, valider les usages et améliorer l'expérience utilisateur au fil des retours.

Pour cette partie du projet, je m'inspire directement de l'approche méthodologique adoptée par Daniel Dudo dans son mémoire *Designing a Tangible Programming Interface for the Internet of Things* (34). Celui-ci mobilise la philosophie *Research through Design* (RtD), un cadre méthodologique de plus en plus utilisé en design d'interaction. L'approche RtD consiste à produire du savoir en explorant des solutions concrètes à travers la création de prototypes, suivie d'une réflexion critique fondée sur les retours d'usage. Elle est particulièrement adaptée aux problématiques complexes et émergentes, dites *wicked problems* (34, 35).

Le processus utilisé par Dudo est structuré autour de trois grandes phases (34) :

- **Conceptualisation** : formulation des hypothèses et des objectifs, revue de la littérature, design workshop.
- **Développement** : construction de prototypes successifs (papier, mid-fi, final), usage de méthodes comme le Wizard of Oz et le Thinking Aloud pour simuler les interactions et recueillir du feedback utilisateur.
- **Évaluation** : tests utilisateurs avec échantillons progressifs, analyse inductive des données qualitatives et réflexion sur les apprentissages extraits du processus.

Ce cycle conception-développement-évaluation est répété à plusieurs reprises afin de raffiner la solution. Il est qualifié de « a reflective conversation with the materials of a situation » (36), chaque itération contribuant à la construction de savoirs pratiques et contextualisés (34).

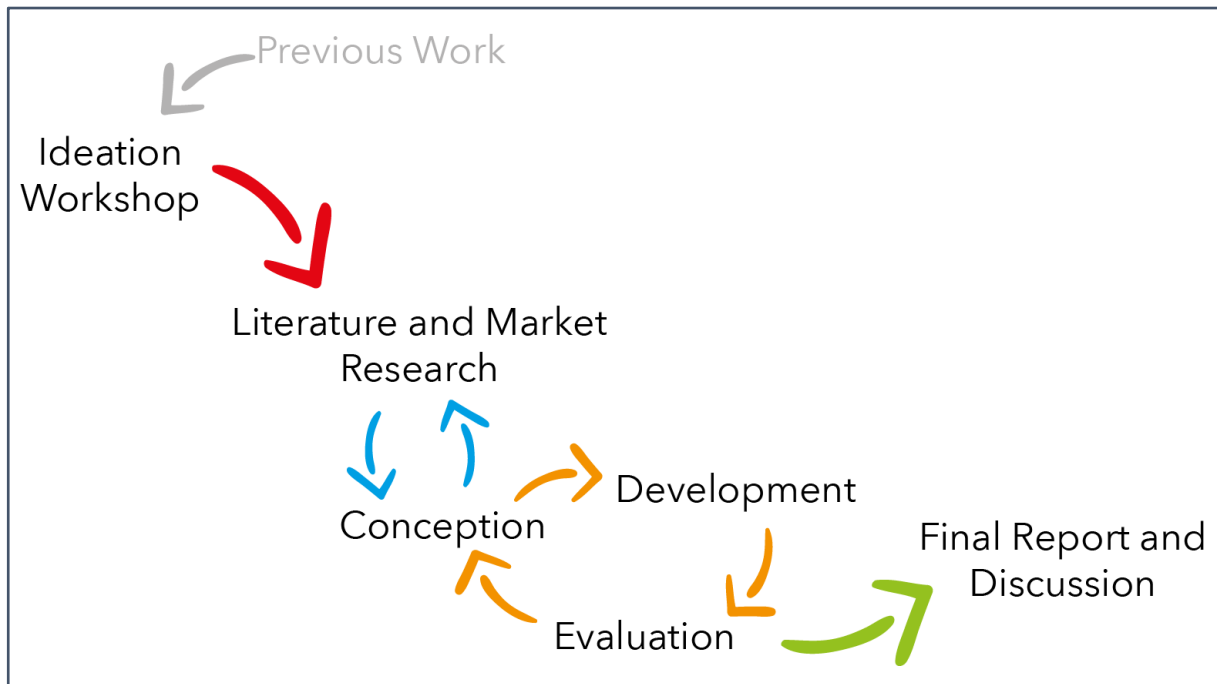


Figure 12 - Processus itératif de conception basé sur le Research through Design (Dudo 2018, p. 24)

Dans mon projet, j'appliquerai une variante de cette méthodologie :

- **Première itération** : réalisation d'un prototype basse fidélité (sans électronique), visant à tester la lisibilité de la métaphore et l'ergonomie de l'objet.
- **Deuxième itération** : prototype fonctionnel embarquant les premiers composants électroniques pour valider les usages.
- **Troisième itération** : version finale testée, intégrant les optimisations UX et matérielles.

Cette organisation duale, à la fois en cascade pour le cadrage global et itérative pour la partie tangible, permet une gestion rigoureuse du projet ainsi qu'une exploration sensible et créative des interactions physiques.

7.2. Tâches

Interface tangible				
N°	Catégorie	Description		
1	Idéation générale		Définitions de concept général	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Idéation	Recherche du concept générale.	4 2
	2	Formalisation de plusieurs idées	Développer en profondeur 2 à 3 concepts.	2 1
2	3	Validation par le mandant	Présenter les concepts pour validation.	1 0
	Prototype 1 (low-fidelity)		Première version non fonctionnelle de l'interface tangible	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Conception maquette papier	Croquis, matériaux simples, storyboard d'usage.	2 1
3	2	Fabrication	Assembler la maquette.	2 1
	Évaluation 1		Première phase de tests utilisateurs	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Planification du test	Définir objectifs, scénarios et mesures.	1 1
	2	Recherche de participants	Sélectionner les participants.	0,5 0,5
	3	Mise en place	Préparer le lieu et le matériel de test.	0,5 0,5
	4	Test utilisateur	Réaliser les tests et observer.	1 0
4	5	Analyse et rapport	Analyser les retours et rédiger le rapport.	2 1
	Prototype 2 (fonctionnel)		Prototype fonctionnel avec électronique et API	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Validation de la faisabilité	Vérifier la faisabilité matérielle/logique.	1 0
	2	Commande de composants	Lister et commander les composants nécessaires.	1 0
	3	Conception	Créer les plans techniques et UX.	4 2
	4	Fabrication	Assembler le prototype final.	4 2
5	Évaluation 2		Deuxième série de tests utilisateurs	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Planification du test	Définir protocole UX avancé.	1 1
	2	Recherche de participants	Échantillon plus large pour évaluation.	0,5 0,5
	3	Mise en place	Préparer l'environnement de test.	0,5 0,5
	4	Test utilisateur	Réaliser les tests approfondis.	1 0
	5	Analyse et rapport	Analyser résultats et compiler les données.	2 1
6	Optimisation finale		Dernière phase de perfectionnement du prototype	
	N°	Tâche	Description	Temps [j] Marge [j]
	1	Ajustements matériel/UX	Appliquer les améliorations UX et techniques.	3 2
	2	Finalisation	Tester la version finale et valider sa cohérence.	2 1

Figure 13 - Tableau des tâches liées à l'interface tangible

Interface digitale				
N°	Tâche	Description	Temps [j]	Marge [j]
1	Idéation	Explorer besoins et fonctions utiles.	2	1
2	Conception	Structurer l'interface digitale.	2	1
3	Prototypage	Créer un prototype visuel ou interactif.	1	0

Figure 14 - Tableau des tâches liées à l'interface digitale

Académique				
N°	Tâche	Description	Temps [j]	Marge [j]
1	Séance bilan intermédiaire	Réunion de suivi officielle à mi-parcours.	1	0
2	Tenu du journal de bord	Tenir un journal régulier des progrès.	Toujours	0
3	Feedback bi-hebdomadaire	Rencontres avec encadrants pour ajustement.	Bi-hebdo	0
4	Écriture du rapport	Rédaction complète du rapport TB.	Toujours	5
5	Création de l'affiche	Design visuel de l'affiche A4 de synthèse.	1	0
6	Livraison des imprimés	Impression et dépôt du rapport et de l'affiche.	1	1

Figure 15 - Tableau des tâches académiques

8. Planning

Le déroulement du projet est structuré autour de dix jalons principaux (milestones), définis en fonction des livrables intermédiaires et des validations nécessaires à l'avancement. Ces repères temporels permettent de rythmer le développement de l'interface tangible et digitale tout en assurant un suivi rigoureux. La planification détaillée est fournie en annexe sous forme de diagramme de Gantt.

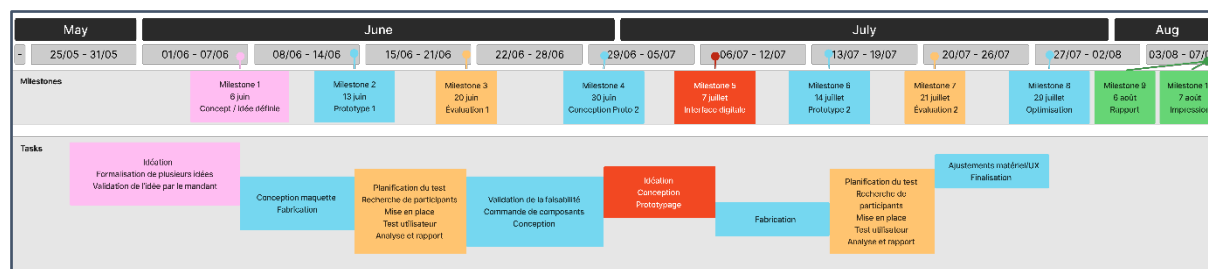


Figure 16 - Milestones avec échéances. Le planning détaillé est à intégrer dans les Annexes.

- 6 juin** : la phase d'idéation se conclut par la définition claire du concept et sa validation par le mandant.
- 13 juin** : le premier prototype low-fidelity est finalisé, permettant une première mise en forme des hypothèses de design.
- 20 juin** : les tests utilisateurs de la première itération sont réalisés et font l'objet d'une première analyse UX.

4. **30 juin** : la conception complète du prototype fonctionnel (Prototype 2) est finalisée, incluant les choix techniques et interactifs.
5. **7 juillet** : un prototype de l'interface digitale est produit en parallèle, servant de complément au dispositif tangible.
6. **14 juillet** : le prototype 2 est entièrement assemblé et prêt pour les évaluations finales.
7. **21 juillet** : la seconde série de tests utilisateurs est achevée, fournissant des données critiques pour les ajustements finaux.
8. **29 juillet** : l'optimisation du prototype est complétée, intégrant les ajustements UX et matériels nécessaires.
9. **6 août** : le rapport académique est terminé et mis en page, prêt à être imprimé.
10. **7 août** : les documents finaux sont imprimés et livrés conformément aux exigences de la HEIG-VD.

Cette structuration en jalons permet une gestion efficace du temps et une répartition équilibrée des tâches sur les douze semaines du projet.

9. Gestion des risques et facteurs de succès

Une analyse systématique des risques a été réalisée afin d'anticiper les obstacles pouvant affecter le bon déroulement du projet. Chaque risque a été évalué sur une échelle de 8 niveaux, selon deux critères : **gravité/impact** (axe X) et **probabilité d'occurrence** (axe Y).

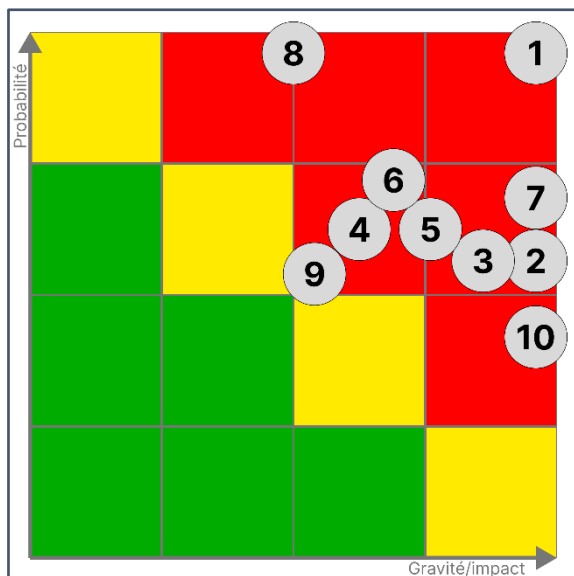


Figure 18 - Matrice Farmer des risques avant mitigation

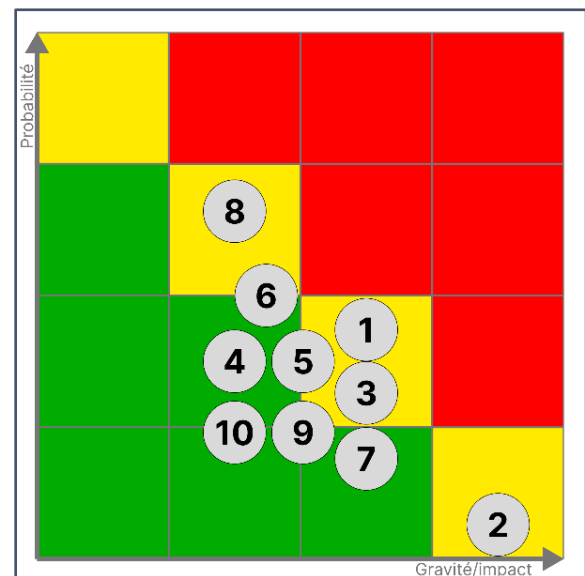


Figure 18 - Matrice Farmer des risques après mitigation

Voici les principaux risques identifiés, accompagnés de leurs mesures de mitigation et du repositionnement observé dans la matrice après traitement :

- **R1 – Manque de temps en fin de projet**
Mitigation : planification hebdomadaire, définition d'un MVP, marge de sécurité avant échéance.
- **R2 – Perte de données**
Mitigation : sauvegardes cloud, disque dur externe.
- **R3 – Panne matérielle** (Arduino, capteurs, alimentation, etc.)
Mitigation : tests initiaux, accès à du matériel de secours, option de simulation logicielle.
- **R4 – Difficultés techniques dans la fabrication de l'interface**
Mitigation : prototypage itératif, recours au FabLab, simplification des formes.
- **R5 – Manque d'expérience en conception d'objets**
Mitigation : tutoriels ciblés, accompagnement ponctuel, tests d'objets simples.
- **R6 – Manque de matériel pour prototyper**
Mitigation : inventaire initial du matériel, adaptation du concept aux ressources disponibles.
- **R7 – Commande des composants en retard**
Mitigation : commande anticipée, choix de fournisseurs locaux ou à livraison rapide.
- **R8 – Manque de sujets à tester durant l'été**
Mitigation : tests anticipés avec étudiants avant l'été, recours à des proches ou testeurs internes.
- **R9 – Difficulté à trouver un concept pertinent**
Mitigation : co-idéation avec encadrants, revue des benchmarks, validation rapide de faisabilité.
- **R10 – Concept non réalisable techniquement**
Mitigation : validation technique précoce, prototype simplifié, scénario alternatif prêt.

10. Apport critique

Ce Travail de Bachelor est un projet à la fois altruiste et expérimental. Il vise à rendre visible l'impact souvent ignoré de nos usages numériques, dans un contexte de transition écologique urgent. Le prototype que je vais concevoir constituera une base concrète pour de futures initiatives, notamment dans la continuité du projet CarbonViz Home. Il pourrait également ouvrir la voie à d'autres travaux exploratoires ou nourrir une réflexion plus large sur la médiation des données énergétiques dans les foyers.

Pour mener à bien ce projet, je vais mobiliser un ensemble de compétences combinant design UX, développement web basé sur une base de données, et conception d'interfaces tangibles. Ce dernier aspect implique une manière différente de penser l'interaction : par la forme, la matière, le geste. Le projet demandera aussi une forte autonomie et une bonne capacité d'organisation sur le long terme. Il me permettra de renforcer mes aptitudes en gestion du temps, en priorisation des tâches et en adaptation. J'acquerrai également de nouvelles connaissances sur les interactions physiques et les mécanismes de nudge, en sortant de mes habitudes pour explorer d'autres formats d'interfaces.

Comme tout projet de Bachelor, celui-ci comportera des limites. Le temps est une contrainte majeure : 16 semaines, dont 4 déjà écoulées. Je vais devoir recentrer le périmètre initial du prototype. Par exemple, le développement d'une interface web complémentaire ne sera pas envisageable afin de me concentrer sur l'essentiel : une première version tangible fonctionnelle et cohérente. Ces choix feront partie du processus et m'apprendront à ajuster mes ambitions aux contraintes réelles du projet.

Ce travail pourrait se prolonger de plusieurs manières : par des tests en conditions réelles, une déclinaison pédagogique dans des écoles, ou encore une version open-source accessible au grand public. Il constituera une base modeste, mais concrète, pour repenser notre rapport aux données numériques et à leur impact invisible.

Bibliographie

1. HEIG-VD. Media Engineering Institute - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/instituts/mei/>
2. HEIG-VD. CarbonViz: Prendre la mesure de nos activités numériques. - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/projets/carbonviz-prendre-la-mesure-de-nos-activites-numeriques>
3. HEIG-VD. Carbovirium - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/recherche/projets/carbovirium>
4. HEIG-VD. *CarbonViz*. [en ligne]. [Chrome]. 13 septembre 2023. Disponible à l'adresse: <https://chromewebstore.google.com/detail/carbonviz/lieikallcilhkihohkajnhmhkiiipaaaf>
5. DERI, Luca, MARTINELLI, Maurizio, BUJLOW, Tomasz et CARDIGLIANO, Alfredo. nDPI: Open-source high-speed deep packet inspection. In : *2014 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [en ligne]. août 2014. pp. 617-622. [Consulté le 25 juin 2025]. DOI 10.1109/IWCMC.2014.6906427.
6. LECORNEY, Stéphane et BOLLI, Laurent. Measuring Online Activities in Households: A Data Collection Methodology. .
7. INSTITUT D'INGÉNIERIE DES MÉDIAS (MEI) DE LA HEIG-VD. Carbonviz Home. [en ligne]. 2024. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://carbonviz.heig-vd.ch/carbovirium/fr>
8. GIFF - GENEVA INTERNATIONAL FILM FESTIVAL. CARBOVIRIUM. *GIFF - Geneva International Film Festival*. [en ligne]. 2024. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.giff.ch/film/carbovirium/>
9. PINAULT, Alexandre. Carbovirium, sélectionné par le pôle de création numérique et la RTS ! *Ingénierie des médias*. [en ligne]. 5 novembre 2023. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://blog.comem.ch/2023/11/05/carbovirium-selectionne-par-le-pole-de-creation-numerique-et-la-rtts/>
10. HES-SO. HES-SO - CarbonViz Home - L'impact du numérique des foyers sur l'environnement. [en ligne]. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.hes-so.ch/recherche-innovation/projets-de-recherche/detail-projet/carbonviz-home-limpact-du-numerique-des-foyers-sur-lenvironnement>

11. HEIG-VD. Une installation artistique pour visualiser notre impact numérique - HEIG-VD. *HEIG-VD*. [en ligne]. [Consulté le 19 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://heig-vd.ch/actualites/2024/05/23/une-installation-artistique-pour-visualiser-notre-impact-numerique/>
12. YVES FROIDEVAUX, OFS. Utilisation d'Internet par les ménages et les individus en 2023 - GNP Diffusion. *Utilisation d'Internet par les ménages et les individus en 2023 - GNP Diffusion*. [en ligne]. 2023. [Consulté le 5 mai 2025]. Disponible à l'adresse: <https://www.bfs.admin.ch/news/fr/2024-0264>
13. PERASSO, Etienne Lees. EVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMERIQUE EN FRANCE ET ANALYSE PROSPECTIVE. *ADEME, Arcep*. 15 avril 2025. pp. 18.
14. HILTY, Lorenz et BIESER, Jan. Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland. . 2017. pp. 62.
15. THALER, Richard H. et SUNSTEIN, Cass R. *Nudge: improving decisions about health, wealth, and happiness*. . New Haven (Conn.) : Yale university press, 2008. ISBN 978-0-300-12223-7.
16. SCHULTZ, P. Wesley, NOLAN, Jessica M., CIALDINI, Robert B., GOLDSTEIN, Noah J. et GRISKEVICIUS, Vladas. The Constructive, Destructive, and Reconstructive Power of Social Norms. *Psychological Science*. mai 2007. Vol. 18, n° 5, pp. 429-434. DOI 10.1111/j.1467-9280.2007.01917.x.
17. FOGG, Bj. A behavior model for persuasive design. In : *Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology*. [en ligne]. Claremont California USA : ACM, 26 avril 2009. pp. 1-7. [Consulté le 12 mai 2025]. ISBN 978-1-60558-376-1. DOI 10.1145/1541948.1541999.
18. CHALAL, M.L., MEDJDOUB, B., BEZAI, N., BULL, R. et ZUNE, M. Visualisation in energy eco-feedback systems: A systematic review of good practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2022. Vol. 162, pp. 112447. DOI 10.1016/j.rser.2022.112447.
19. RIST, Thomas et MASOODIAN, Masood. Promoting Sustainable Energy Consumption Behavior through Interactive Data Visualizations. *Multimodal Technologies and Interaction*. 21 juillet 2019. Vol. 3, n° 3, pp. 56. DOI 10.3390/mti3030056.
20. TIEFENBECK, Verena, GOETTE, Lorenz, DEGEN, Kathrin, TASIC, Vojkan, FLEISCH, Elgar, LALIVE, Rafael et STAAKE, Thorsten. Overcoming Salience Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation. *Management Science*. 28 novembre 2016. Vol. 64, n° 3, pp. 1458-1476. DOI 10.1287/mnsc.2016.2646.
21. PICCOLO, Lara S. G., BARANAUSKAS, Cecília et AZEVEDO, Rodolfo. A socially inspired energy feedback technology: challenges in a developing scenario. *AI & SOCIETY*. 1 août 2017. Vol. 32, n° 3, pp. 383-399. DOI 10.1007/s00146-016-0653-8.
22. GUSTAFSSON, Anton et GYLLENSWÄRD, Magnus. The power-aware cord: energy awareness through ambient information display. In : *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2 avril 2005. pp. 1423-1426. [Consulté le 25 juin 2025]. CHI EA '05. ISBN 978-1-59593-002-6. DOI 10.1145/1056808.1056932.

23. ISHII, Hiroshi et ULLMER, Brygg. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In : *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*. [en ligne]. Atlanta Georgia USA : ACM, 27 mars 1997. pp. 234-241. [Consulté le 19 mai 2025]. ISBN 978-0-89791-802-2. DOI 10.1145/258549.258715.
24. SHAER, Orit et HORNECKER, Eva. Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*. 2009. Vol. 3, n° 1-2, pp. 1-137. DOI 10.1561/11000000026.
25. DUMIČIĆ, Žarko, THORING, Katja, KLÖCKNER, Hermann et JOOST, Gesche. Design elements in data physicalization: A systematic literature review. In : *DRS2022: Bilbao*. [en ligne]. 25 juin 2022. [Consulté le 15 mai 2025]. DOI 10.21606/drs.2022.660.
26. TAN, Jingwei, CHEN, Jiang et PENG, Shengfang. Principles and Patterns of Interaction Design under Concept of Calm Technology. In : *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*. [en ligne]. Guangzhou, China : IEEE, 28 mai 2021. pp. 473-476. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-66541-537-8. DOI 10.1109/AIID51893.2021.9456552.
27. VISSERS, Jorick et GEERTS, David. Evaluating the User Experience of Tangible Interface Prototypes. . 16 février 2014. pp. 6.
28. BELL, Fiona, WU, Shanel, CAMPO WOYTUK, Nadia, LAZARO VASQUEZ, Eldy S., ALISTAR, Mirela et BUECHLEY, Leah. Making Biomaterials for Sustainable Tangible Interfaces. In : *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. [en ligne]. Cork Ireland : ACM, 11 février 2024. pp. 1-5. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 9798400704024. DOI 10.1145/3623509.3634740.
29. DRAGICEVIC, Pierre, JANSEN, Yvonne et VANDE MOERE, Andrew. Data Physicalization. In : VANDERDONCKT, Jean, PALANQUE, Philippe et WINCKLER, Marco (éd.), *Handbook of Human Computer Interaction*. [en ligne]. Cham : Springer International Publishing, 2021. pp. 1-51. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-3-319-27648-9.
30. JANSEN, Yvonne, DRAGICEVIC, Pierre, ISENBERG, Petra, ALEXANDER, Jason, KARNIK, Abhijit, KILDAL, Johan, SUBRAMANIAN, Sriram et HORNBÆK, Kasper. Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. Seoul Republic of Korea : ACM, 18 avril 2015. pp. 3227-3236. [Consulté le 20 mai 2025]. ISBN 978-1-4503-3145-6. DOI 10.1145/2702123.2702180.
31. BAE, S. Sandra, ZHENG, Clement, WEST, Mary Etta, DO, Ellen Yi-Luen, HURON, Samuel et SZAFIR, Danielle Albers. Making Data Tangible: A Cross-disciplinary Design Space for Data Physicalization. In : *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [en ligne]. New Orleans LA USA : ACM, 27 avril 2022. pp. 1-18. [Consulté le 15 mai 2025]. ISBN 978-1-4503-9157-3. DOI 10.1145/3491102.3501939.
32. KRESTANOVA, Alice, CERNY, Martin et AUGUSTYNEK, Martin. Review: Development and Technical Design of Tangible User Interfaces in Wide-Field Areas of Application. *Sensors*. 22 juin 2021. Vol. 21, n° 13, pp. 4258. DOI 10.3390/s21134258.

- 33. SCHWABISH, Jonathan. Bringing Data to Life: Community Data Physicalization. . juillet 2024. pp. 24.
- 34. DUDO, Daniel. Designing a Tangible Programming Interface for the Internet of Things. *Internet of Things*. 22 janvier 2018. pp. 140.
- 35. RITTEL, Horst W J et WEBBER, Melvin M. Dilemmas in a general theory of planning. . 1973. pp. 15.
- 36. SCHÖN, Donald A. *Designing as reflective conversation with the materials of a design situation*. 1 mars 1992.

Annexe 20

Affiche

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Affiche de présentation du Travail de Bachelor, synthétisant le contexte, les objectifs, la démarche, le fonctionnement et les résultats du projet.

Etudiant : Jérémy Martin

Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains

Enseignant responsable : Olivier Ertz

Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 04 août 2025

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Contexte et objectif

Le numérique est omniprésent dans les foyers suisses, mais son impact environnemental reste difficile à percevoir.

Nos usages quotidiens (ex. : streaming, cloud, réseaux sociaux) reposent pourtant sur une infrastructure énergivore.

Ce projet donne forme à cet impact en réalisant un objet physique interactif qui reflète, en temps réel, la consommation numérique d'un foyer.

L'objectif est de rendre nos usages plus visibles et compréhensibles, afin de susciter une réflexion sur nos pratiques numériques.



Figure 1 : Photographie du prototype fonctionnel réalisé (hauteur 30cm, diamètre 11cm)

Démarche

Le projet suit une approche centrée utilisateur inspirée du principe de recherche par le design (Research through Design).

Étapes principales :

- Revue de littérature
- Ateliers d'idéation et création de concepts
- Prototypage itératif
- Tests utilisateurs et améliorations continues

Fonctionnement

La fleur suit un cycle hebdomadaire et réinitialise sa santé chaque lundi.

Elle se fane progressivement selon la quantité de données utilisées par le foyer, comparée à un seuil défini.

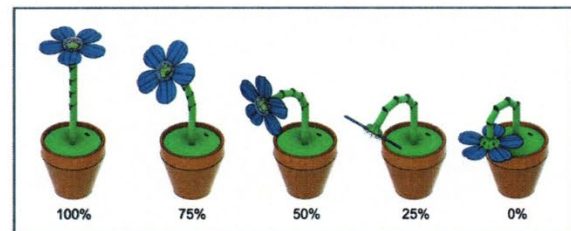


Figure 2 : États de santé de la fleur

Le bulbe s'allume brièvement à intervalles réguliers pour signaler l'intensité de la consommation en temps réel.



Figure 3 : Indication lumineuse de la consommation instantanée

La fleur reflète ainsi à la fois la consommation cumulée sur la semaine et le débit instantané.

Résultats, impacts et perspectives

Accueilli positivement, le prototype rend visible la consommation numérique hebdomadaire d'un foyer. Il suscite une prise de conscience et pousse à s'interroger sur ses habitudes. Les tests ont permis d'identifier des améliorations, comme l'ajout d'une interface web pour consulter ses usages ou un système de bonnes actions pour que la fleur regagne de la "santé".

Auteur : Jérémie Martin
Répondant externe : Stéphane Lecorney
Prof. responsable : Olivier Ertz
Sujet proposé par : Stéphane Lecorney, Media Engineering Institute (MEI)

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Stéphane Lecorney: de
Jérémie Martin: de
Olivier Ertz: de

Annexe 21

Déclaration de confidentialité

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Document précisant le niveau de confidentialité appliqué au Travail de Bachelor, ainsi que les conditions de diffusion et de consultation associées.

Etudiant : Jérémy Martin
Travail proposé par : Stéphane Lecorney
Media Engineering Institute (MEI)
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
Enseignant responsable : Olivier Ertz
Année académique : 2024-2025

Yverdon-les-Bains, le 04 août 2025

Diplômant : Jérémy Martin

Titre du travail de Bachelor : Conception d'une interface de visualisation de
l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Enseignant responsable du TB : Olivier Ertz

Entreprise partenaire : Media Engineering Institute (MEI)

Tous les TB sont déposés à la Bibliothèque de la HEIG-VD qui en gère l'archivage et la consultation. Quel que soit le niveau de confidentialité du TB, le nom du diplômé, le nom de l'enseignant responsable, le titre du TB et le résumé publiable figurent dans tous les documents de présentation des TB ainsi que sur la plateforme de consultation des TB (<http://tb.heig-vd.ch>). L'enseignant responsable veille à ce que le titre du TB et le résumé publiable soient rédigés conformément au niveau de confidentialité voulu. Les TB peuvent être soumis à un logiciel anti-plagiat. Dans ce cas, leur contenu sera traité de manière confidentielle.

☒ **Le TB n'est pas confidentiel**

Outre les informations mentionnées ci-dessus, les documents de présentation du TB contiennent également le nom de l'entreprise partenaire, le résumé publiable et une affiche. Le TB peut être consulté sur la plateforme des TB.

☐ **Le TB est confidentiel.**

Les conditions suivantes de diffusion des informations sont appliquées :

Aucune consultation ou emprunt du TB n'est permis hormis par l'enseignant responsable du TB et le diplômé qui s'engagent à ne pas faire usage des informations mises à leur disposition. Le TB porte la mention « **confidentiel** ».

☐ Oui ☐ Non Nous acceptons que **le nom de l'entreprise partenaire** figure dans les documents publiés (titre, résumé, affiche, etc.), ainsi que dans la plateforme de consultation des TB.

☐ Oui ☐ Non Nous acceptons que **l'affiche** du TB figure sur la plateforme de consultation des TB (l'affiche est au préalable validée par l'entreprise partenaire).

Dans tous les cas, un accord de confidentialité doit être signé par le diplômé, l'expert et toutes les personnes participant à l'évaluation du TB.

Nous déclarons accepter les conditions de diffusion du Travail de Bachelor indiquées.

Diplômé

Date

30.07.2025

Nom et signature

Jérémy Martin

Enseignant responsable

Date

21/8/2025

Nom et signature

Olivier Ertz

Entreprise partenaire

Date

30/07/2025

Nom et signature

LECORNEY Stéphane

N.B.:

Ce document fait partie intégrante du cahier des charges du TB.

La forme masculine est utilisée comme genre neutre et désigne à la fois les hommes et les femmes.

Annexe 22

Procès-verbal : Bilan intermédiaire

Conception d'une interface de visualisation de l'impact énergétique du numérique dans un foyer

Non confidentiel

Contenu : Réunion de bilan intermédiaire visant à valider l'orientation du travail de Bachelor, faire le point sur l'avancement et ajuster la suite du projet. Elle a permis d'évaluer les prototypes développés, de discuter des retours utilisateurs, de définir les priorités techniques et méthodologiques, et de planifier les étapes finales jusqu'aux livrables.

Lieu : HEIG-VD, site de St-Roch, salle S204a
Date : 19 juin 2025
Heure : 10h30 à 11h45
Participant·e·s : Jonathan Favre-Lamarine (Enseignant responsable),
Stéphane Lecorney (Répondant externe, MEI),
Jérémy Martin (Diplômant)

1. Objectifs de la réunion

Cette séance intermédiaire avait pour but d'évaluer l'état d'avancement du travail de Bachelor, d'identifier d'éventuels points de blocage, de clarifier les décisions techniques en suspens, ainsi que de discuter de la forme finale du rapport et des éléments visuels attendus (résumé, affiche). Elle visait également à valider l'orientation générale du projet et à planifier les prochaines étapes.

2. Ordre du jour

- Accueil et objectifs de la séance
- Présentation de l'avancement du projet
- Présentation du plan de travail restant
- Soumission et discussion de l'affiche et du résumé publiable
- Points divers et clôture

3. Avancement du projet

Le projet a connu un léger retard initial durant la phase d'idéation, mais ce décalage a été rattrapé depuis. Deux prototypes tangibles ont été développés grâce à l'impression 3D : une fleur articulée et un personnage (bonhomme). Ce choix d'explorer des prototypes physiques plutôt que des maquettes numériques s'est avéré pertinent pour les tests utilisateurs.

4. Résultats des tests utilisateurs et choix de la piste finale

Des tests exploratoires ont été menés auprès d'étudiants en Ingénierie des Médias sur les deux prototypes développés. La fleur a été perçue comme une métaphore claire et intuitive de l'évolution de la consommation numérique. Son mouvement, qui consiste à faner progressivement, s'intègre bien dans le champ de vision périphérique des utilisateurs, en cohérence avec les principes de la calm technology. Ce type d'interaction subtile pourrait avoir un impact durable sur les habitudes énergétiques. Toutefois, plusieurs défis techniques subsistent : complexité mécanique (articulations, guidage de câble, motorisation) et conception centrée uniquement sur la dégradation, avec un état de base qui se fane en cas de surconsommation.

Le bonhomme, bien que mécaniquement plus simple à réaliser, demanderait davantage de développement logiciel pour gérer les animations et la synchronisation des données. Il génère une forte identification : les utilisateurs se projettent facilement dans le personnage, ce qui renforce leur implication. La visualisation des données sous forme de jauge ou d'historique est particulièrement bien reçue, car elle aide à comprendre et suivre sa consommation.

Les deux objets sont perçus comme des déclencheurs efficaces : ils suscitent une réaction, une prise de conscience, et incitent les utilisateurs à s'informer davantage. En ce sens, ils jouent un rôle d'introduction émotionnelle ou symbolique, mais doivent être complétés par un second niveau de lecture plus analytique. Plusieurs testeurs ont exprimé le besoin d'un support numérique, tel qu'une application ou un site web, permettant un accès à des données plus précises. Celui-ci est perçu comme un outil complémentaire à l'objet physique.

Concernant l'alimentation, des utilisateurs ont exprimé une préférence pour une solution solaire, perçue comme plus cohérente avec la thématique environnementale. La batterie arrive en seconde

position, principalement pour sa praticité. Le secteur est globalement mal perçu, bien qu'il soit en réalité le plus écologique pour un usage domestique continu.

5. Décisions prises

Il a été convenu de procéder à l'analyse des retours utilisateurs afin de prendre du recul et d'orienter la suite du projet. La décision finale entre les deux prototypes sera prise à la lumière de ces résultats. Une interview supplémentaire avec un profil utilisateur différent est souhaitée dans les prochaines 24 heures pour enrichir l'échantillon et valider certaines hypothèses.

6. Rapport et livrables

Plusieurs approches pour structurer le rapport final ont été discutées. Une structure chronologique a été évoquée comme solution classique et simple à suivre, mais jugée parfois peu pertinente. En alternative, une structure axée sur les résultats a été proposée : le rapport commencerait par présenter le contexte et les objectifs, suivis des résultats finaux et des éléments méthodologiques clés. Les explorations non retenues seraient reléguées en annexe, accompagnées d'un résumé intégré dans le corps du texte afin de garantir la lisibilité sans imposer la lecture exhaustive de ces annexes.

L'objectif commun est de produire un rapport autosuffisant, synthétique et orienté sur les éléments significatifs. Il devra mettre en valeur les décisions prises, les apprentissages clés et les justifications du choix final, sans s'enliser dans des détails techniques superflus. Le recours aux annexes permet de documenter les pistes écartées et les étapes exploratoires, tout en allégeant le corps principal du rapport.

Enfin, tous les participants à la réunion s'accordent sur l'importance d'inclure une section finale consacrée aux perspectives ou à une autocritique réflexive. Celle-ci permettra d'identifier les limites rencontrées, les choix discutables et les pistes d'amélioration pour un projet ultérieur ou une version future du prototype.

7. Prochaines étapes

Le projet entre désormais dans une phase de réalisation concrète. Un prototype High Fidelity, intégrant l'électronique et les données issues du foyer, sera développé. Cela implique la validation technique, la commande des composants, la conception technique et UX, puis l'assemblage du dispositif. En parallèle, une interface digitale simplifiée sera conçue pour compléter l'objet tangible, en fonction des besoins identifiés.

Une nouvelle série de tests utilisateurs est prévue. Un protocole UX plus approfondi sera défini, avec un échantillon de participants élargi. L'environnement de test sera préparé, les tests réalisés, puis les résultats analysés afin d'orienter les ajustements finaux.

Une phase d'optimisation suivra, visant à affiner l'expérience utilisateur et à valider la cohérence globale du prototype. Cette phase servira également de marge de sécurité en cas de retards dans le projet de TB.

Enfin, les livrables académiques seront poursuivis : tenue du journal de bord, rédaction du rapport, création de l'affiche A4, puis impression et dépôt final.