

Validation des choix de conception pour un histogramme bio-inspiré destiné à accompagner une pratique partagée de propreté énergétique sur le lieu de travail

Validating Design Choices of a Bio-Inspired Histogram to Support a Shared Practice of Clean Energy at the Workplace

Elodie Bouzekri
elodie.bouzekri@estia.fr

Univ. Bordeaux, ESTIA INSTITUT DE TECHNOLOGIE
Bidart, France

Guillaume Rivière
g.riviere@estia.fr

Univ. Bordeaux, ESTIA INSTITUT DE TECHNOLOGIE
Bidart, France

RÉSUMÉ

Face aux défis présentés par le changement climatique, de nombreuses interfaces présentant un retour d'information sur les ressources énergétiques disponibles, consommées ou économisées ont été proposées dans le but d'accompagner un changement de comportement vers un comportement davantage en accord avec l'environnement dans le domaine de l'IHM durable. Si, dans ce but, des systèmes bio-inspirés ont été proposés, peu se présentent sous forme tangibles ou d'histogrammes. Ceci, malgré les résultats encourageants, autant en termes de prise de conscience de la consommation énergétique que de connexion émotionnelle développée avec le système, des interfaces artistiques visant l'engagement dans un comportement environnemental. Dans le but de concevoir un système permettant d'accompagner les utilisateurs dans une pratique partagée de décalage de la demande énergétique, nous présentons les résultats des premières étapes de notre démarche. Cet article se concentre sur la validation de choix de conception en amont du cycle de conception et de développement, avant d'engager du temps et des frais de conception et de développement de prototypes physiques; l'étude du changement de comportement est hors périmètre du travail présenté. Ainsi, les résultats présentés concernent l'efficacité et l'UX de maquettes statiques et animées d'interfaces d'éco-prévisions et à éco-feedback sous forme d'histogrammes bio-inspirés. Les résultats indiquent que l'efficacité d'un histogramme bio-inspiré par rapport à un histogramme classique est moindre. La seconde étude montre qu'une partie de cette perte d'efficacité peut être résolue par la contextualisation des données. Également, sans être significatif, la métaphore de la plante à feuilles se révèle plus efficace et plus esthétique qu'une métaphore plus proche d'un histogramme classique inspirée du bambou. Nous concluons que la métaphore de la plante à feuilles peut être utilisée pour une interface d'éco-prévisions et à éco-feedback sous

forme d'histogramme visant à décaler la demande énergétique des appareils pouvant fonctionner sur batterie.

ABSTRACT

Faced with the challenges presented by climate change, many interfaces presenting feedback on available, consumed or saved energy resources have been proposed to support a change of behavior towards a more environmental one in the field of sustainable HCI. If, for this purpose, bio-inspired systems have been proposed, few of them are presented in a tangible way or as histograms. This, despite encouraging results, as much in terms of awareness of energy consumption as in terms of emotional connection developed with the system, of artistic interfaces aiming at the commitment in an environmental behavior. With the aim of designing a system to support users in a shared practice of shifting energy demand, we present the results of the first steps of our approach. This paper focuses on design choice validation at an early stage of the design and development cycle, before spending time and money on physical prototyping; studying behavior change remains outside the scope of this work. Thus, the results presented concern the effectiveness and UX of static and animated mock-ups of eco-prediction and eco-feedback interfaces in the form of bio-inspired histograms. The results indicate that the efficacy of a bio-inspired histogram compared to a conventional histogram is lower. The second study shows that part of this loss of efficacy can be resolved by contextualizing the data. Also, without being significant, the leaf plant metaphor is found to be more effective and aesthetic than a metaphor closer to a classical histogram inspired by bamboo. We conclude that the leaf plant metaphor can be used for an eco-forecast and eco-feedback interface in the form of a histogram to shift the energy demand of battery-capable devices.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → Empirical studies in HCI; Field studies; • **Social and professional topics** → Sustainability.

MOTS CLÉS

IHM durable, interfaces tangibles, éco-prévisions, éco-feedback, bio-inspiration

KEYWORDS

Sustainable HCI, Tangible User Interfaces, eco-forecast, eco-feedback, bio-inspiration

ACM Reference Format:

Elodie Bouzekri and Guillaume Rivière. 2023. Validation des choix de conception pour un histogramme bio-inspiré destiné à accompagner une pratique partagée de propreté énergétique sur le lieu de travail. In *IHM '23 : 34^e conférence Francophone sur l'Interaction Humain-Machine, April 03–07, 2023, Troyes, France*. ACM, New York, NY, USA, 20 pages. <https://doi.org/10.1145/3583961.3583965>

1 INTRODUCTION

Le dernier rapport du GIEC [49] cite la transformation numérique (adoption ou augmentation de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication), si régie de manière adéquate, comme pertinente pour atténuer le changement climatique et répondre aux défis de durabilité. Bien qu'il ne soit pas cité, le domaine de l'IHM durable s'inscrit dans cet objectif en ajoutant la problématique environnementale à la conception des systèmes interactifs, que ce soit dans leur fabrication ou leur utilisation [30]. Dans ce second cas et afin de faire prendre conscience aux utilisateurs de l'impact de leurs actions sur l'environnement, les interfaces à éco-feedback affichent un retour sur ces actions [18] comme les ressources consommées, les déchets produits ou les états des ressources. La connaissance des utilisateurs relative à l'impact des actions humaines sur l'environnement n'est qu'un des facteurs contribuant à un comportement environnemental, concevoir des systèmes définissant des buts environnementaux et prenant en compte l'engagement des utilisateurs dans la poursuite de ces buts peuvent être associés à ce retour d'information [18]. Bremer et al. [4] soulignent que les acteurs de l'IHM durable, s'étant confrontés aux limitations et aux critiques des approches centrées sur l'individu portées par les premières approches à éco-feedback, se dirigent maintenant vers des approches influençant plutôt des groupes ou des communautés. En ce sens, Clear et Comber [1] définissent des pistes afin de considérer des approches orientées pratique¹ plutôt qu'orientées individu : les utilisateurs n'utilisent pas d'énergie ou des ressources mais ces ressources sont utilisées pour accomplir des pratiques. Le but recherché étant de concevoir des systèmes soutenant des pratiques davantage environnementales que les précédentes. Dans cet article, nous prendrons comme exemple l'intervention sur le lieu de travail sur les pratiques concernant l'usage de l'ordinateur portable.

Sur le lieu de travail, nous parlerons de comportement pro-environnemental lors : d'éco-initiatives (ex. réutiliser du papier), d'un engagement éco-civique (ex. participer aux événements environnementaux de l'organisation) et d'éco-aide auprès des autres employés (ex. encourager les collègues à adopter un comportement environnemental) [33]. Promouvoir une diminution de la consommation énergétique peut ne pas être conciliable avec les activités professionnelles. Cependant, une alternative est de proposer de maximiser la consommation d'énergie renouvelable plutôt que de l'énergie non-renouvelable. Sur de tels lieux, nous proposons d'introduire un histogramme physique à changement de forme auprès

de salariés rapportant un sentiment de proximité avec l'environnement. Ce système affiche la disponibilité d'énergie renouvelable heure par heure. Ceci, afin de permettre aux utilisateurs de décaler leur consommation d'énergie des appareils électriques pouvant fonctionner sur batterie pendant les heures de travail. Ainsi, nous proposons au groupe d'utilisateurs de maximiser leur consommation d'électricité de sources renouvelables.

Ce système est conçu avec la finalité d'accompagner un groupe d'utilisateurs vers un changement de comportement. Ainsi, l'engagement des utilisateurs avec le système doit durer dans le temps. En effet, le travail présenté prend lieu dans une problématique plus large s'attachant à explorer l'impact de la modalité de présentation (graphique ou physique) sur l'engagement des utilisateurs dans une pratique environnementale. Dès lors, en plus de rester utile à la réalisation du décalage de la demande énergétique après la familiarisation avec le système, le système doit permettre un attachement émotionnel et social [25]. La finalité est ainsi de palier l'habitude et la lassitude des utilisateurs envers les messages de changement de comportement dans le temps. Nous présentons dans cet article nos premières étapes afin de concevoir de manière incrémentale un tel système. En résultat du processus suivi, ce système prend la forme d'un histogramme à feuilles dynamique. Nous détaillons les étapes de conception et les résultats de deux études en ligne validant les choix de conception de ce futur histogramme physique à feuilles sur la base de prototypes basses fidélités sous forme de croquis. Les résultats présentés concernent donc l'efficacité et l'expérience utilisateur pour des tâches réalisées en ligne sur des maquettes statiques et animées d'histogrammes bio-inspirés. La mesure de l'engagement des utilisateurs ainsi que du changement de comportement étant hors du périmètre de cet article, elles feront l'objet de futurs travaux.

Sur la base des travaux connexes et d'études ultérieures, nous suivons un processus centré utilisateur pour concevoir un système qui engage un groupe d'utilisateurs dans une pratique environnementale partagée et adaptée au contexte d'usage. Ce processus est illustré en figure 1.

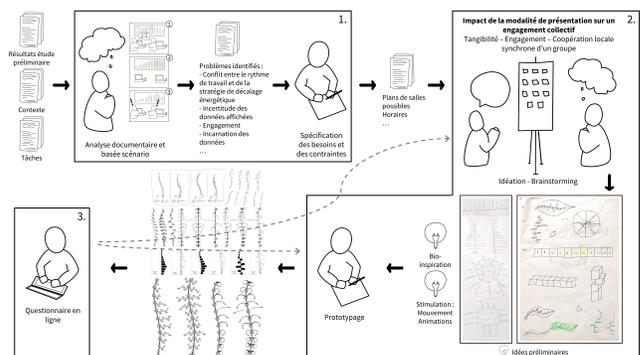


FIGURE 1 : Processus centré utilisateur suivi lors du projet.

- (1) Dans un premier temps, nous avons étudié les tâches des utilisateurs ainsi que les contextes d'usages possibles de notre futur système. Ce travail nous a mené à spécifier une stratégie de décalage énergétique que notre système doit soutenir. Le détail de ce travail est présenté en section 4 ;

1. phénomène socialement constitué qui caractérise nos activités de tout les jours et nos routines [1]

- (2) Ensuite, nous avons réalisé plusieurs séances d'idéation sous forme de brainstorming afin de générer des idées de conception se conformant à nos contraintes et nos objectifs. Différentes solutions de conception ont été prototypées suite à ces séances. Le détail de ce travail est présenté en section 3 ;
- (3) Enfin, nous avons procédé à des évaluations sous forme de questionnaires lors de deux études utilisateur en ligne. Le détail de ce travail est présenté en section 5. Suite aux résultats obtenus, nous avons itéré afin de générer de nouvelles solutions de conception prenant en compte les résultats.

2 TRAVAUX CONNEXES

2.1 Engagement avec les systèmes tangibles

L'expérience utilisateur (UX) évolue dans le temps. Ses facteurs importants dépendent de la phase actuelle de l'UX² [25]. Tout d'abord, la stimulation induite par l'effet de nouveauté est importante pour l'adoption du système [25]. De plus, la stimulation est un prédicteur important de l'engagement [20]. Cependant, la stimulation tend à diminuer avec la fin de l'effet de nouveauté. Si la convivialité et l'utilité perçues sont importantes dans la deuxième phase, pendant la troisième et la dernière, l'attachement émotionnel et le rôle social sont importants pour l'adoption du système [25].

Jansen et al. [22] soulignent le potentiel pouvoir engageant des systèmes présentant les données de manière tangible et encouragent à explorer davantage les raisons de cet engagement. Dans le domaine des interfaces tangibles, plusieurs études tendent à montrer le pouvoir engageant des interfaces tangibles. Dans un musée, Schou et Løvlie [45] ont constaté que l'engagement des visiteurs avec un journal animé permettant des interactions tangibles était suffisant pour que les utilisateurs puissent se rappeler et expliquer au moins un des trois objets historiques et susciter des conversations sur l'exposition entre les parents et les enfants. Cho et al. [7] rapportent leur travail pour améliorer les leçons d'apprentissage des enfants de maternelle avec des blocs tangibles représentant la tête et le corps des animaux. Ils ont constaté que les enfants s'engagent plus activement avec les blocs tangibles qu'avec le livre graphique. Xie et al. [55] ont comparé le plaisir et l'engagement des enfants avec un puzzle graphique, un puzzle tangible et un puzzle classique. Ils ont constaté qu'un plus grand nombre d'enfants répétaient le jeu avec le puzzle tangible et le puzzle classique.

De par ces résultats, il nous semble judicieux d'explorer l'impact d'une interface tangible pour un système supportant un changement de comportement environnemental des utilisateurs. De plus, cet engagement doit pouvoir durer au-delà de l'effet de nouveauté. Or, Chalal et al. [5] nous informent que les interfaces à éco-feedback artistiques et physiques sont applicables pour aider les utilisateurs à les rendre curieux de leur consommation énergétique et à développer une connexion émotionnelle avec l'environnement.

2.2 Interface accompagnant un changement de comportement énergétique environnemental

Chalal et al. [5] et Daniel et al. [12] ont passé en revue les systèmes de retour d'information écologique en matière d'énergie. Nous proposons une classification de ces systèmes suivant deux axes : (1) la modalité de présentation des données et d'interaction (graphique, graphique et tangible, tangible) et (2) la symbolique utilisée pour présenter les données énergétiques (pas de symbolique énergétique ou environnementale, symbolique énergétique, symbolique énergétique et environnementale). La classification de vingt-quatre de ces systèmes selon ces deux axes est illustrée figure 2. Ces vingt-cinq systèmes sont explicités ci-après.

Afin de permettre des stratégies de décalage énergétique, il existe des interfaces graphiques présentant un retour d'information écologique en matière d'énergie à travers des graphes [48] ou d'horloges présentant les disponibilités d'énergie renouvelable [24, 28]. Simm et al. [48] montrent que l'affichage par le système Tiree Energy Pulse des variations de la disponibilité de l'énergie renouvelable, de la météo et de conseils sur demande permet aux utilisateurs d'adopter une telle stratégie de décalage de la demande énergétique. Certains foyers participant à l'étude ont changé les habitudes de leur foyer. Également pour permettre de telles stratégies, Local Energy Indicator [36] est une interface tangible se présentant sous la forme d'un boîtier affichant par le biais de LED l'énergie solaire et éolienne disponible ainsi que le total d'énergie stockée. Aussi, Wattom [39] combine une prise intelligente et une montre connectée afin d'informer la consommation d'énergie de tout appareil électrique et de contrôler l'alimentation de ces appareils. La couleur en arrière-plan de Wattom affiche la quantité d'énergie renouvelable présente dans le réseau au moment de l'interaction. Dans un objectif similaire, Elbanhawey et al. [15] ont proposé une lampe changeant de couleur selon le taux d'énergie renouvelable stocké. Avec E-Forecast, en plus d'un éco-feedback, Kjeldskov et al. [28] proposent d'utiliser un système d'éco-prévisions (c.a.d. des prévisions affichées pour une finalité de comportement environnemental) à propos du prix, de la disponibilité de l'énergie renouvelable et de la demande sur le réseau.

Combinant interfaces tangibles et graphiques, mais dans le but de faire s'interroger les utilisateurs sur des questions environnementales, Green SqueezeBox [23] est une série de boules vertes qui permet aux utilisateurs de répondre à des questions à la manière d'une échelle de Likert. Dans un but similaire, Pittarello et Brutti [37] proposent de combiner des entrées tangibles avec une interface graphique modifiant le paysage et le nombre de boules présentées pour décrire différents niveaux de CO₂ correspondant à différentes variables environnementales (localisation, humidité, température, etc.). Sur le lieu de travail, Coutaz et al. [8] proposent de coupler un histogramme bio-inspiré (Histo-trees) présentant les treize dernières heures de consommation avec une représentation tangible sous forme de cairns de bois de la consommation énergétique des neuf dernières semaines. Le système propose une compétition entre deux équipes : présentation du gagnant sur les treize dernières heures sur l'histo-tree, de la comparaison sur les neuf dernières semaines et de la comparaison avec la consommation sur la même période l'année passée. Également, Ecorbis [50] est une sculpture

2. Karapanos et al. [25] définissent les trois phases suivantes : Orientation, Incorporation et Identification. D'après leurs travaux, l'augmentation de la familiarité, de la dépendance fonctionnelle, puis de l'attachement émotionnel envers le système sont les principales forces motivant les transitions entre ces différentes phases.

qui, associée à une application, permet de visualiser l'impact du comportement sur l'environnement dans le cadre du foyer familial.

Les interfaces comme Tiree Energy Pulse [48], The Box [24], Ecorbis [50] ou Local Energy Indicator [36], n'utilisent pas de symbolique énergétique ou environnementale particulière mais présentent les quantités ou la disponibilité d'énergie renouvelable ou non renouvelable. Certains systèmes utilisent une symbolique énergétique. C'est le cas de Wattom [39] mais aussi de Power-Aware Cord [19] qui se présente sous la forme d'une rallonge électrique donnant un retour lumineux sur la consommation d'énergie d'une multi-prise. Watt-Lite [26] est un ensemble de trois torches permettant d'afficher, à travers la taille des faisceaux lumineux, la consommation électrique de l'entreprise. L'une affiche la consommation courante, une autre la plus importante de la journée et la troisième, la moins importante de la journée. Quintal et al. [40] ont proposé Watt-I-See, une interface tangible présentant les sources locales de production, les quotas de production d'électricité à travers quatre vortex colorés et le pourcentage de production d'énergie renouvelable à travers une prise électrique lumineuse et colorée. Fidler et al. [16] ont proposé différents prototypes : un jouet mimant une émotion négative pour une mauvaise utilisation de l'énergie aux enfants et un paillason qui pouvait prévenir si une lumière était laissée allumée dans le foyer. Daniel et al. [11] proposent CairnFORM, une interface tangible à changement de forme pour aider à réduire la consommation d'énergie non renouvelable des appareils électriques sur le lieu de travail en adoptant une telle stratégie de décalage énergétique permettant de favoriser l'utilisation d'énergie renouvelable. Également dans un lieu public, ArchiExpression [29] est un ensemble de petits panneaux solaires arrangés en matrice. Chacun représente une unité du campus sur lequel est installé ArchiExpression. Le système a été déployé dans le but d'étudier l'engagement et l'attention portée par les utilisateurs sur le système. Enfin, Rodgers et Bartram [43] proposent une interface présentant les données énergétiques de manière artistique.

D'autres systèmes utilisent une symbolique, à la fois, énergétique et environnementale. Plusieurs exemples d'interfaces graphiques peuvent être citées. Par exemple, Pereira et Nunes [34] proposent une illustration de la forêt endémique locale évoluant selon la consommation énergétique qui se déclenche lorsque les utilisateurs finaux n'ont pas utilisé le système pendant deux minutes. Affichant également un paysage, SIN AIS de Nisi et al. [31] accélère ou ralentit la vitesse des nuages en mouvement et des ombres des arbres en fonction de la consommation d'énergie des utilisateurs. ChArGED (CleAnweb Gamified Energy Disaggregation) proposé par Dimitriou et al. [14] présente un arbre qui se développe en fonction de la quantité d'énergie économisée et des défis accomplis. Vilarinho et al. [54] proposent CoSSMunity qui, à travers des graphiques et des visualisations de jauges ayant la forme d'arbres et de forêts, affiche un score énergétique. Rist et al. [42] proposent Smart Garden, une image d'un jardin qui change dynamiquement. Plus la consommation d'énergie est faible, plus le jardin est florissant et en bon état. Une consommation supérieure à la moyenne entraîne le dépérissement du jardin. De manière similaire, Dillahunt et Mankoff [13] proposent d'afficher en fond d'écran de tablette un ours polaire seul sur un bloc de glace en cas de forte consommation d'énergie et une famille d'ours polaires en cas de faible consommation d'énergie. Kim et al. [27] proposent le concept de Coralog dans lequel le corail

blanchit, la population de corail diminue et les poissons du récif disparaissent en fonction du gaspillage énergétique des utilisateurs. La conception des systèmes de Pittarello et al. [37] et de Coutaz et al. [8] s'inspirent également de la nature afin de présenter les données.

Afin de permettre aux concepteurs de s'inspirer de la nature pour les systèmes tangibles à changement de forme, Qamar et al. [38] proposent Morphino, une boîte à outils à base de cartes contenant des exemples de changement de forme dans la nature. Par ailleurs, il existe des interfaces tangibles utilisant une symbolique énergétique et environnementale. Par exemple, Piccolo et al. [35] proposent SEETree (Socially-inspired Energy Eco-feedback Technology Tree), un arbre physique illuminé de sept branches poposant de rendre tangibles les économies d'énergie des élèves en fonction d'un score quotidien d'économie d'énergie du groupe. Au-delà de la conception de systèmes bio-inspirés, l'interaction humain- plante [6] propose aux utilisateurs d'interagir avec de véritables plantes. Par exemple, Pudica de Seow et al. [47] est un framework qui permet de contrôler une plante réelle (mimosa pudica) dont chaque feuille peut être contrôlée (pliée et dépliée) par stimulation électrique. Pudica a été utilisé pour afficher la qualité de l'air sur une discrétisation à trois niveaux.

D'après les travaux connexes, nous observons que peu de travaux proposent d'étudier des systèmes tangibles à éco-feedback ou à éco-prévision ayant la plante comme métaphore. Parmi ceux qui l'étudient, nous avons échoué à trouver des travaux permettant d'accompagner les utilisateurs dans une pratique de décalage énergétique socialement partagée. Cette stratégie est plutôt supportée par l'affichage de la disponibilité de l'énergie renouvelable produite localement heure par heure par un histogramme [11] ou une horloge à code couleur [24], ou stockée dans le réseau au moment de l'interaction [15, 36, 39, 40]. Ces travaux sont présentés en vert dans la figure 2. Nous proposons de supporter la planification des tâches des utilisateurs, par l'affichage d'éco-prévisions, afin de maximiser l'utilisation d'énergie renouvelable pour le fonctionnement des appareils électriques. Ainsi, nous proposons d'afficher heure par heure la disponibilité d'énergie renouvelable. Dans ce but, nous avons choisi d'explorer la représentation par histogramme physique bio-inspiré des données énergétiques. Un éco-feedback sur l'activité du groupe est également offert par le système. Les travaux présentés dans cet article se situent dans l'encadré vert de la figure 2.

2.3 Histogrammes physiques et ornementés

Les histogrammes physiques n'ont été que peu explorés comme interface pour présenter des données environnementales. Une exception peut être citée, il s'agit de CairnFORM [11]. Il se présente sous la forme d'un histogramme vertical à anneaux dynamiques affichant les prévisions de disponibilité de l'énergie renouvelable de la journée. Une version graphique CairnSCREEN a également été développée. CairnFORM est efficace pour la tâche de comparaison (92,2% de réussite) et la tâche d'intervalle (93,3% de réussite). Cependant, CairnFORM n'est que peu efficace pour la tâche d'ordonnement (52,2 % de réussite) [10]. De plus, les qualités hédoniques et pragmatiques de CairnFORM étaient plus élevées à la fin de l'expérience de deux mois qu'au début [9]. Au contraire, les qualités hédoniques et pragmatiques du CairnSCREEN diminuent avec le temps [9]. Il

Symbolique énergétique et environnementale	SINAIS [31]	ChArGED [14]	CoSSMunity [54]	Pittarello et Brutti [37]	Coutaz et al [8]	SEETree [35]		
	Coralog [27]	Pereira et Nunes [34]	Community Monitor [13]					
	Smart Garden [42]							
Symbolique énergétique	Rodgers et Bartram [43]			Green Squeeze-Box [23]	Wattom [39]	CairnFORM [11]	Watt-Lite [26]	Watt-I-See [40]
						Elbanhawy et al. [15]	Archi-Expression [29]	Grubius [16]
Pas de symbolique énergétique ou environnementale	Tiree Energy Pulse [48]	The Box [24]	eForecast [28]	Ecorbis [50]		Local Energy Indicator [36]		
	Graphique			Graphique + Tangible		Tangible		

FIGURE 2 : Classification des travaux portant sur la représentation des données énergétiques pour l'accompagnement d'un changement de comportement environnemental. Nos travaux se placent dans l'espace encadré en vert.

existe d'autres exemples d'histogrammes tangibles à changement de forme non spécifiquement conçu pour un type de donnée particulier, par exemple inFORM [17] et EMERGE [53]. Cependant, des études montrent que les histogrammes physiques permettent d'être plus efficient pour des tâches de rangement, d'ordonnancement et de comparaison d'information que les histogrammes graphiques [21]. Également, les résultats de Stusak et al. [52] indiquent que les histogrammes physiques permettent une meilleure mémorisation de données quantitatives à propos de pays. Ces résultats ont été raffinés par Stusak et al. [51] qui montrent que l'intérêt et la compréhension des données permet d'améliorer la mémorisation des données avec de tels systèmes. Également, Ren et Hornecker [41] ont comparé un histogramme en réalité virtuelle et un histogramme tangible présentant des données numériques, non triviales et intéressantes pour les utilisateurs où les utilisateurs ont répondu plus rapidement avec les interfaces tangibles.

Cependant, les histogrammes étudiés sont des histogrammes à barres classiques qu'ils soient tangibles ou graphiques. Andry et al. [2] ont étudié l'impact des ornements sur des infographies graphiques incluant des histogrammes. Les infographies ornementées ont été jugées plus esthétiques et préférées de manière générale aux infographies classiques bien que jugées moins claires.

En outre, bien que l'impact (graphique ou tangible) sur l'efficacité, la mémorisation ou l'esthétique par exemple de la modalité de présentation d'un histogramme ait été étudiée, seul Daniel et al. [11] étudient l'impact de la modalité sur l'engagement des utilisateurs dans un comportement environnemental. Sur la base de ces résultats, nous proposons de concevoir un histogramme vertical à changement de forme bio-inspiré afin de maximiser l'utilisation d'énergie renouvelable sur le lieu de travail.

3 VERS UN PROTOTYPE D'HISTOGRAMME PHYSIQUE BIO-INSPIRÉ

3.1 Principes de conception

La conception du système prend lieu dans le contexte de persuasion présenté dans le tableau 1. Les chercheurs conçoivent et développent le système et donnent accès à ce système aux utilisateurs avec la participation des patrons d'entreprises. Les groupes d'utilisateurs volontaires peuvent ensuite utiliser le système seuls afin de réaliser le décalage énergétique qui constitue le comportement cible. Ces groupes utilisateurs ne pouvaient pas réaliser de décalage énergétique efficace par l'absence de prévisions d'énergie renouvelable disponible au court de la journée. Par le processus centré utilisateur employé, nous considérons que les groupes utilisateurs seront enclins à utiliser la système. Le contexte d'usage prend place sur le lieu de travail des utilisateurs, les jours ouvrés pendant les heures de travail. Ainsi, le comportement cible peut être adopté en parallèle des tâches de travail des utilisateurs. Ces utilisateurs sont sélectionnés par leur propension initiale à agir de manière environnementale. Le système sera déployé sous forme physique et sous forme graphique. Le système physique sera sensible à l'usure et aux pannes mécaniques et fera l'objet de maintenances. Concernant la stratégie de persuasion employée, le message à transmettre concerne le décalage de la consommation d'énergie lorsque de l'énergie renouvelable est suffisamment disponible. Nous proposons d'intervenir sur les pratiques entourant l'usage de l'ordinateur portable en engageant par le comportement des groupes d'utilisateurs. La route empruntée pour diffuser ce message est indirecte, le système ne présentera ni d'arguments ou de justifications mais présentera les informations nécessaires à la nouvelle pratique, la rendant ainsi possible.

Dans ce contexte et en combinant les résultats des travaux connexes ainsi que l'étude des contraintes liées au contexte d'usage, nous avons dégagé les points importants pour la conception d'un

TABLE 1 : Notre contexte de persuasion à la lumière des recommandations de Oinas-Kukkonen et Harjumaa [32]

Contexte de persuasion	Source/Élément du contexte	Implémentation
L'intention	Acteur qui persuade	Les chercheurs et les patrons d'entreprises sont les parties prenantes à l'initiative de l'intervention du système. Concernant la pratique de l'usage d'appareil à batterie, les utilisateurs peuvent influencer leur propre comportement uniquement en utilisant le système et sans autre aide extérieure.
	Changement / Résultat attendu	La finalité du système est de modifier les pratiques en place sur l'usage des appareils à batterie en formant un nouveau comportement énergétique chez les utilisateurs. Seul l'ordinateur portable est considéré dans notre étude. Puis, le second objectif est de maintenir ce nouveau comportement dans la durée comme le permettra une future étude sur plusieurs mois.
	Biais des concepteurs	Les concepteurs assument, de part le processus de conception choisi, que les utilisateurs seront enclins à utiliser le système et à échanger autour du système.
L'évènement	Contexte d'usage	Le contexte d'usage est le lieu de travail des utilisateurs. Ce lieu de travail est partagé par plusieurs utilisateurs. Chaque journée travaillée, les utilisateurs pourront maximiser leur consommation d'énergie renouvelable de leurs appareils à batterie.
	Contexte utilisateur	Les utilisateurs sont placés dans un contexte facilitant la collaboration pour réaliser ensemble une tâche de décalage énergétique.
	Contexte technologique	Le système est développé est un histogramme bio-inspiré. Il sera déployé sous forme graphique et sous forme physique. Les utilisateurs peuvent utiliser le système dès qu'ils sont dans la même pièce que celui-ci.
La stratégie	Le message	Le but est d'accompagner un groupe d'utilisateurs dans une nouvelle pratique environnementale (décalage énergétique) socialement partagée.
	Le chemin	Une route indirecte est empruntée pour persuader les utilisateurs à changer leur pratique. Le système permet de présenter la production d'énergie renouvelable locale et disponible durant la journée. Le système permet également de faire le lien entre la pratique (l'utilisation et le stockage de l'énergie renouvelable) et l'environnement (bio-inspiration).

système tangible affichant des prévisions énergétiques sur le lieu de travail afin de maximiser l'utilisation d'énergie renouvelable. Les principes de conception que nous avons identifiés lors de nos activités d'analyse sont :

- (1) **Bio-inspiration** : Le système doit pouvoir susciter une réflexion collective sur les pratiques énergétiques des utilisateurs. Ainsi, au-delà d'une visualisation efficace et efficiente, nous privilégions une visualisation artistique des données. L'apparence du système doit laisser transparaître à l'utilisateur le but qu'il supporte ainsi que la nature des données qu'il présente. Le système permet aux utilisateurs de modifier leur pratique énergétique vers une pratique plus environnementale. Ainsi, de manière similaire à Coutaz et al. [8], la métaphore du vivant et du végétal nous paraît appropriée pour représenter, à la fois, le but environnemental et l'énergie renouvelable.
- (2) **Espace professionnel** : De manière similaire à Watt-Lite [26] ou CairnFORM [11], le système est utilisé par des employés. Comme le montre l'étude préliminaire de Daniel et al. [11], un système affichant les taux de production d'énergie renouvelable heure par heure est utilisable pour des utilisateurs partageant un même bureau pour décaler la demande énergétique du groupe. En effet, les heures de travail étant structurées et routinières, les heures de consommation d'énergie sont similaires pour chaque utilisateur ce qui permet un affichage unique pour le groupe utilisateur.
- (3) **Pratique socialement partagée** : Sur le lieu de travail, le système peut être installé à la vue de tous. Chacun peut donc consulter les taux de disponibilité d'énergie renouvelable

quand il le souhaite et prendre conscience des possibilités pour faire évoluer son comportement vers un comportement davantage environnemental. Également, en étant physiquement présent parmi les utilisateurs, le système agit comme un facilitateur à la discussion [44]. Ainsi, une stratégie de décalage énergétique partagée peut être définie entre les utilisateurs.

- (4) **Notification périphérique** : En exploitant les interactions périphériques, le système tangible permet aux utilisateurs de mener plusieurs tâches à la fois et d'interagir de manière spontanées avec le système [44, 50]. Comme l'ont montré Daniel et al. [11], le mouvement de l'interface tangible à changement de forme permet de notifier les utilisateurs sans les déranger. Ceci est particulièrement utile dans notre contexte d'usage où la tâche principale de travail doit être interrompue le moins possible.

3.2 Choix de conception

En respectant les principes de conception décrits ci-avant, nous avons réalisé différents croquis d'histogrammes présentés en figure 4. Nous avons également réalisé des images animées au format GIFs avec l'outil gratuit et libre GIMP afin de présenter l'animation des histogrammes ornements aux utilisateurs. Après deux études en ligne, nous avons sélectionné un histogramme à feuilles présenté en figure 5. Ces histogrammes implémentent différents principes de conception persuasifs de Oinas-Kukkonen et Harjumaa [32] que nous présentons dans le tableau 2. En nous référant à ces principes persuasifs ainsi qu'aux principes de conception présentés

ci-avant, nous détaillons, dans la suite de cette section, nos choix de conception.

3.2.1 Bio-inspiration. À l'issue des séances de brainstorming et de deux études en ligne, nous avons opté pour un design bio-inspiré. À l'instar de ChArGED [14] ou de CoSSMunity [54], nous avons choisi d'agrémenter notre histogramme présentant la disponibilité des énergies renouvelables d'un inceptif visuel émotionnel sous la forme d'une plante vivante. En outre, pour les interfaces à éco-feedback, Chalal et al. [5] recommandent de combiner des visualisations, telles que les graphiques à barres, avec des représentations artistiques inspirées de la nature car "cela semble augmenter l'engagement de l'utilisateur final dans un comportement pro-environnemental" et les utilisateurs "qui développent un attachement émotionnel aux représentations inspirées de la nature se montrent plus soucieux de l'environnement". Tout au long du cycle de conception, nous nous assurons que le système paraisse visuellement esthétique aux utilisateurs (voir tableau 2 catégorie "Supporter le dialogue", fonction "Goût/Préférence") afin de renforcer sa force persuasive [32]. Également, nous espérons que ce visuel bio-inspiré agisse comme un vecteur d'influence normative (voir tableau 2 catégorie "Supporter le rapport social", fonction "Influence normative"). Ceci, en rappelant de manière constante le but environnemental du comportement qu'il permet d'accomplir et auxquels les utilisateurs cibles sont sensibles. Dans la suite de cet article, les barres de cet histogramme à feuilles seront désignées par le terme de 'feuilles'. L'inspiration pour la conception de ces feuilles animées est présentée en figure 3a.

3.2.2 Espace professionnel. Comme Watt-Lite [26], notre système est tangible et co-localisé avec les utilisateurs sur leur lieu de travail. Un seul système sera déployé dans l'open-space ou le bureau de chaque groupe d'utilisateurs. L'objectif est d'engager les utilisateurs dans une pratique commune en créant des discussions pour planifier le comportement futur et en affichant le retour d'information sur les actions du groupe d'utilisateurs. Ainsi, le groupe d'utilisateur peut coopérer afin d'atteindre le comportement cible (voir tableau 2 catégorie "Supporter le rapport social", fonction "Coopération"). Nous proposons de présenter aux utilisateurs le taux de disponibilité d'énergies renouvelables pour chaque heure de la journée de travail (de 8h à 17h59). Ces prévisions sont visibles tout au long de la journée. Chaque feuille de l'histogramme représente le taux de disponibilité des énergies renouvelables pour l'heure correspondante. Nous mettons en valeur le pic de disponibilité de l'énergie renouvelable en illuminant de jaune la feuille correspondante afin d'améliorer la lisibilité de notre graphique. Cette heure est importante car les utilisateurs doivent brancher leur ordinateur portable à cette heure pour maximiser leur consommation d'énergie renouvelable. Ces éléments permettent aux utilisateurs d'avoir un rappel du comportement cible et de réduire l'effort nécessaire pour accomplir le comportement cible en suggérant l'heure à laquelle le décalage énergétique doit avoir lieu (voir tableau 2 catégories "Supporter la tâche principale" et "Supporter le dialogue", fonctions "Réduction", "Rappel" et "Suggestion"). Également, l'utilisation du système doit être adaptée au rythme de travail des utilisateurs. Pour cela, nous avons mené une analyse de tâches afin de minimiser les efforts supplémentaires à fournir pour l'utilisateur et maximiser l'efficacité de la stratégie de décalage de la demande énergétique.

3.2.3 Pratique socialement partagée. Comme Watt-Lite [26], notre système affiche seulement un retour d'information sur la consommation d'un groupe d'utilisateurs. Cependant, nous affichons lorsque le groupe consomme de l'énergie renouvelable et non pas leur consommation d'énergie totale. Également, de manière similaire à SEETree [35] ou CairnFORM [11], la feuille change de couleur en fonction du nombre d'utilisateurs du groupe qui consomment de l'énergie renouvelable à l'heure correspondante. Dans notre cas, nous avons choisi de blanchir, comme CairnFORM [11], la feuille proportionnellement au nombre d'utilisateurs ayant branchés sur secteur leur ordinateur portable à l'heure correspondante. Également, ce feedback sur la consommation d'énergie renouvelable collective est un procédé de ludification. Les utilisateurs tentent de blanchir au maximum les heures de grande disponibilité d'énergie renouvelable [11]. Les utilisateurs peuvent identifier lorsque d'autres membres du groupe réalisent le comportement cible et les voir réaliser ce comportement. Ainsi, les utilisateurs seront plus enclins à le réaliser également par facilitation et apprentissage social [32] (voir tableau 2 catégorie "Supporter le rapport social", fonctions "Apprentissage social" et "Facilitation sociale").

3.2.4 Notification périphérique. L'histogramme à feuilles affiche une seule variation de la disponibilité des énergies renouvelables à la fois (un seul pic). Lorsque le minimum après le pic est atteint, l'histogramme à feuilles se met à jour pour afficher la variation suivante. Une animation des feuilles de l'histogramme permet de notifier les utilisateurs d'une mise à jour des données ou qu'une nouvelle variation est en train d'être affichée. Semblable à l'une des inspirations proposées par Qamar et al. [38], l'animation des feuilles suit un mouvement de dépliage-plier de type vague comme le montre la figure 3. Les feuilles se déplient en fonction du taux de disponibilité de l'énergie renouvelable. Plus la feuille est dépliée, plus la disponibilité de l'énergie renouvelable est importante (voir figure 3b).

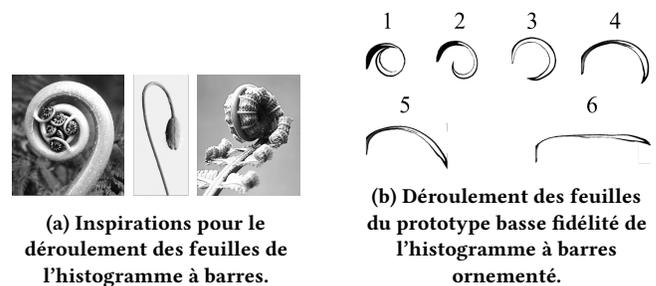


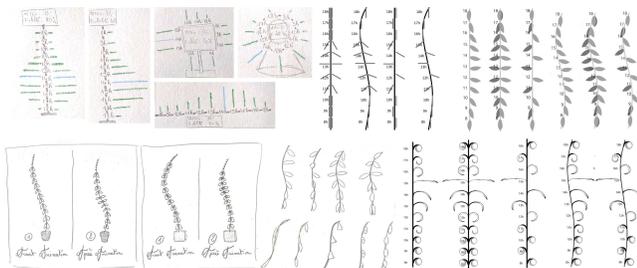
FIGURE 3 : Inspirations et déroulement des feuilles du prototype basse fidélité de l'histogramme à barres ornementé.

4 DÉFINITION DE LA STRATÉGIE DE DÉCALAGE ÉNERGÉTIQUE ET INSTRUCTIONS AUX UTILISATEURS

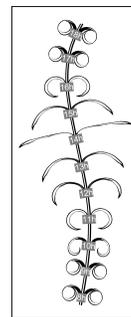
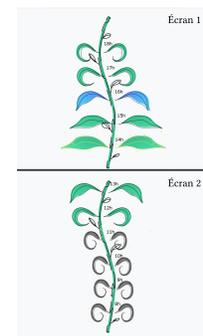
Nous travaillons avec des utilisateurs qui sont des employés de bureau. Ils utilisent principalement leur ordinateur portable comme outil de travail. Nous avons effectué une analyse de tâches et une

TABLE 2 : Nos choix de conception implémentant les principes de persuasion de Oinas-Kukkonen et Harjumaa [32] sélectionnés.

Catégorie	Fonction	Implémentation
Supporter la tâche principale	Réduction	Le système met en valeur l'heure à laquelle il est le plus judicieux de consommer ou stocker de l'énergie afin de maximiser sa consommation d'énergie renouvelable.
Supporter le dialogue	Rappel	Le système affiche constamment la disponibilité d'énergie renouvelable lors de la journée de travail.
	Suggestion	Le système suggère de consommer de l'énergie aux pics de disponibilités.
	Goût/Préférence	Le système est conçu dans le but de paraître visuellement esthétique aux utilisateurs. Ceci est soutenu par différentes évaluation tout au long de la conception du système.
Supporter le rapport social	Apprentissage social	Le système soutient une pratique socialement partagée et co-localisées. Les utilisateurs utilisent le même et unique système, planifient ensemble la pratique et ont la possibilité de s'observer les uns et les autres réaliser cette pratique. Également, le système fournit un retour lorsque plusieurs utilisateurs réalisent la pratique dans la même tranche horaire.
	Influence normative	Le système par son apparence rappelle aux utilisateurs la finalité environnementale et écologique de son utilisation.
	Facilitation sociale	Le système affiche un retour en fonction du nombre d'utilisateurs réalisant la pratique pendant les tranches horaires affichées.
	Coopération	Le système facilite les réunions et la discussion par son emplacement central [50].
Supporter la crédibilité	Fiabilité	Le système se base sur des données énergétiques réelles. Le système affiche par seuils les prévisions réelles des taux de disponibilité d'énergie renouvelable produite localement.

**FIGURE 4 : Exploration : Prototypes préliminaires de l'ornementation de l'histogramme à barres verticales.**

analyse basée sur des scénarios afin d'analyser l'impact de l'utilisation de notre système sur le travail quotidien des utilisateurs sur leur lieu de travail. En particulier, nous concentrons nos efforts sur une question soulevée par les travaux de Daniel et al. [11] concernant les mises à jour des prévisions au cours de la journée et les instructions données aux utilisateurs. En effet, les utilisateurs déclarent être perdus, ne sachant pas quel comportement appliquer après la mise à jour des prévisions. Concernant les instructions, certaines situations sont sources d'erreurs. Certains utilisateurs éteignent accidentellement leur ordinateur portable en retirant la batterie alors qu'ils ont préalablement débranché leur ordinateur portable. En plus de ce problème déjà connu, l'analyse des tâches met en évidence des tâches supplémentaires nécessaires à la mise en œuvre d'une stratégie de décalage énergétique potentiellement exigeantes sur le plan cognitif. En effet, après avoir lu les informations

**FIGURE 5 : Prototype basse fidélité de l'histogramme bio-inspiré.****FIGURE 6 : Nouvelle version du prototype basse fidélité de l'histogramme bio-inspiré à l'issue des deux études.**

affichées par le système et reconnu le pic de disponibilité des énergies renouvelables, les utilisateurs doivent mémoriser ou vérifier l'heure de pic, déterminer quand l'ordinateur doit être débranché, se souvenir de retirer la batterie lorsqu'elle est déchargée, déterminer quand réinsérer la batterie, et quand brancher l'ordinateur portable. Toutes ces tâches doivent être répétées pour chaque pic de disponibilité et pour chaque mise à jour. De plus, en cas d'erreur ou de situation non spécifiée par les instructions, les utilisateurs ne disposent d'aucune aide. Les utilisateurs ont des instructions différentes selon si leur ordinateur laisse la possibilité de retirer la batterie.

À la suite de l'analyse de tâches et des scénarios, nous avons simplifié les instructions de la stratégie de changement d'énergie proposé par Daniel et al. [11]. Nous décidons de ne plus demander de retirer la batterie de l'ordinateur portable. Ainsi, les utilisateurs ne doivent planifier que deux tâches en fonction de la variation de l'énergie renouvelable : débrancher l'ordinateur portable et brancher l'ordinateur portable. De plus, ils disposent tous d'instructions unifiées. Afin de reconcevoir ces instructions, nous nous basons sur cinq profils de journées représentatives de variations typiques de la disponibilité des énergies renouvelables en utilisant l'outil SEDYL³ [11] que nous avons étendu pour nos besoins. Ces variations, provenant de l'enregistrement sur une année de la disponibilité d'énergie renouvelable, sont présentées en figure 7. Nous comparons plusieurs stratégies de décalage énergétique avec ces variations :

- A. **Brancher l'ordinateur portable toute la journée** : rechargez l'ordinateur portable toute la journée.
- B. **Débranchez l'ordinateur portable en arrivant au bureau** : laissez l'ordinateur portable se décharger en début de journée, puis le recharger au pic d'énergie renouvelable ou avant si la batterie est faible.
- C. **Ordinateur portable déchargé pour le pic d'énergie renouvelable** : laissez l'ordinateur portable se décharger trois heures (temps estimé pour décharger à 50% un ordinateur portable) avant le pic d'énergie renouvelable, puis le recharger.
- D. **Ordinateur portable déchargé une heure avant le pic d'énergie renouvelable** : laissez l'ordinateur portable se décharger quatre heures avant le pic d'énergie renouvelable, puis le recharger une heure avant le pic d'énergie renouvelable.

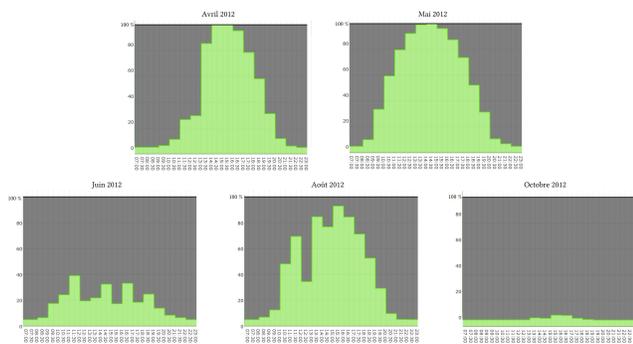


FIGURE 7 : Cinq profils de variations typiques des taux de disponibilité d'énergie renouvelable produite localement présentés en pourcentage exportées à partir de l'outil SEDYL (<https://itame.estia.fr/Sedyl/>).

Nous présentons les résultats de cette comparaison pour les variations de mai (voir Tableau 3) et d'avril (voir Tableau 4) qui sont les plus courants dans l'année [9].

Malgré une consommation totale plus élevée de la stratégie B par rapport à la stratégie A, la consommation d'énergie non renouvelable est plus faible et la consommation d'énergie renouvelable est plus élevée pour une variation typique du mois de mai (tableau 3) et

TABLE 3 : Consommation d'énergie renouvelable (ER) et non-renouvelable (EnR) simulée d'un utilisateur pour une variation typique de disponibilité d'énergie renouvelable en mai 2012 (pic de disponibilité d'énergie renouvelable à 14 heures).

Stratégie	ER (Wh)	EnR (Wh)	Total (Wh)
A. Brancher toute la journée	155.27	110.73	266.00
B. Débranchez en arrivant au bureau	239.50	30.06	269.56
C. Décharge pour le pic	168.03	105.56	273.59
D. Décharge pour 1h avant pic	176.53	96.90	273.42

- A. (08h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- B. (08h00 - 11h00 : décharger l'ordinateur portable), (11h01 - 13h59 : recharger l'ordinateur), (14h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- C. (08h00 - 10h58 : recharger l'ordinateur portable), (10h59 - 13h59 : décharger l'ordinateur portable), (14h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- D. (08h00 - 09h57 : recharger l'ordinateur portable), (09h58 - 12h58 : décharger l'ordinateur portable), (12h59 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- Nous considérons un temps de décharge maximum de 3 heures.

TABLE 4 : Consommation d'énergie renouvelable (ER) et non-renouvelable (EnR) simulée d'un utilisateur pour une variation typique de disponibilité d'énergie renouvelable en avril 2012 (pic d'énergie renouvelable à 15h).

Stratégie	ER (Wh)	EnR (Wh)	Total (Wh)
A. Brancher toute la journée	110.11	155.88	266.00
B. Débranchez en arrivant au bureau	149.72	119.84	269.56
C. Décharge pour le pic	133.84	139.75	273.59
D. Décharge pour 1h avant pic	149.22	124.37	273.59

- A. (08h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- B. (08h00 - 11h00 : décharger l'ordinateur portable), (11h01 - 14h59 : recharger l'ordinateur portable), (15h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- C. (08h00 - 11h58 : recharger l'ordinateur portable), (11h59 - 14h59 : décharger l'ordinateur portable), (15h00 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- D. (08h00 - 10h57 : recharger l'ordinateur portable), (10h58 - 13h58 : décharger l'ordinateur portable), (13h59 - 18h00 : recharger l'ordinateur portable);
- Nous considérons un temps de décharge maximum de 3 heures.

du mois d'avril (tableau 4) avec la stratégie B. La même observation s'applique aux variations typiques du mois d'août et de juin. La consommation d'énergie non renouvelable est plus élevée avec les stratégies C et D qu'avec la stratégie B. Cependant, lorsque la quantité d'énergie renouvelable disponible tout au long de la journée est insuffisante, l'application d'une stratégie est inefficace. Ce cas s'applique à la variation typique du mois d'octobre. Par conséquent, nous choisissons de conserver la stratégie B et de n'afficher la variation uniquement si l'application de la stratégie B tout au long de la journée est efficace. Une illustration de ces instructions est présentée par des pictogrammes dans la figure 8.

Afin de maximiser le stockage de l'énergie renouvelable, les utilisateurs doivent recharger leur ordinateur portable lorsque la disponibilité de l'énergie renouvelable atteint un pic et qu'elle diminue. Cependant, une correction des prévisions de disponibilité de l'énergie renouvelable oblige les utilisateurs à replanifier leur stratégie de consommation d'énergie pour atteindre l'objectif de consommation d'énergie renouvelable. Afin de résoudre ce problème, nous choisissons de limiter le nombre de mises à jour des prévisions à une seule par jour après l'heure du déjeuner. En outre,

3. <https://itame.estia.fr/Sedyl/>

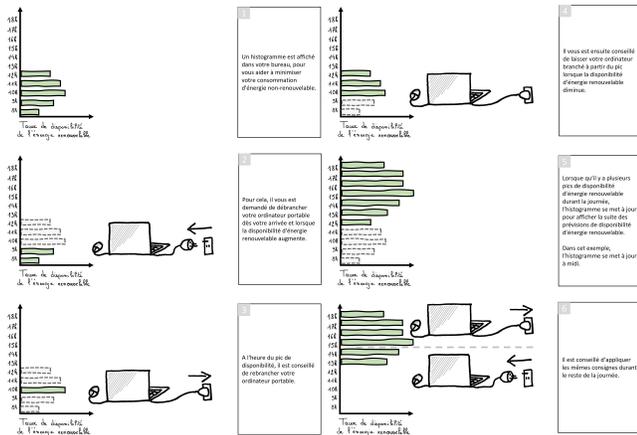


FIGURE 8 : Instructions données aux utilisateurs lors de l'étude n°2.

nous n'affichons la mise à jour que si le pic d'énergie renouvelable est décalé de plus d'une heure, l'objectif étant d'équilibrer le gain par rapport à l'effort fourni par l'utilisateur.

5 EVALUATION

Dans cette section, nous présentons deux études en ligne. Dans la première, nous avons réalisé une étude préliminaire afin de comparer la facilité d'utilisation des histogrammes à barres et de l'histogramme inspiré des plantes appelé "PlantHISTO". Dans une deuxième étude, nous avons comparé deux histogrammes bio-inspirés : PlantHISTO et un histogramme inspiré du bambou appelé "BambHISTO".

5.1 Étude en ligne n°1

L'objectif de cette étude préliminaire était de déterminer si un histogramme bio-inspiré présente un niveau d'utilisabilité similaire à celui d'un histogramme classique pour les tâches d'identification des pics de disponibilité de l'énergie renouvelable et les phases croissante et décroissante de disponibilité. Ceci afin de déterminer si une conception ornementée d'un histogramme est envisageable pour les tâches à réaliser.

5.1.1 Méthode. Afin de concevoir et déployer notre questionnaire nous avons utilisé l'outil Google Form⁴. Seize participants, recrutés par le biais d'une liste de diffusion professionnelle, de notre laboratoire ont participé à cette étude (5 femmes et 11 hommes). En introduction du questionnaire, les participants prennent connaissance du nom et de l'objet du projet dans lequel s'inscrit cette étude. Les noms et les contacts des auteurs de l'étude sont également communiqués aux participants. Ensuite, les droits à la confidentialité des participants sont rappelés sous la forme proposée par la CNIL⁵. Enfin, la lecture de l'histogramme est explicitée lorsque celui-ci est présenté avant les questions le concernant. Trois groupes de participants ont été assignés au hasard. Chaque groupe a été exposé à toutes les conditions dans un ordre différent présenté dans le

tableau 5. Les histogrammes utilisés dans les différentes conditions sont présentés dans la figure 9. Nous avons fait évoluer les histogrammes vers une forme davantage courbée et alternant les barres, quitte à se détacher des recommandations de visualisation, afin d'évaluer quelles sont les caractéristiques que nous pouvons sélectionner pour concevoir un histogramme ornementé bio-inspiré. Pour chaque version des histogrammes à barres, un histogramme remplaçant les barres par des feuilles est présenté.

TABLE 5 : Ordres de passation des conditions pour chaque groupe.

Groupe	Histogrammes droits unilatéraux	Histogrammes courbes unilatéraux	Histogrammes courbes alternés
A	1	2	3
B	3	1	2
C	2	3	1

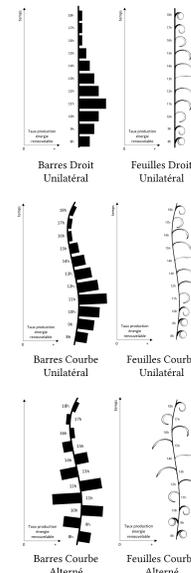


FIGURE 9 : Histogrammes comparés lors de l'étude n°1.

Pour chaque histogramme, nous posons les trois questions suivantes :

- (1) A quelle heure le taux de production¹ d'énergie renouvelable est-il le plus important ?
- (2) Indiquer les heures où la production¹ d'énergie renouvelable est ascendante (de la plus faible jusqu'au pic).
- (3) Indiquer les heures où la production¹ d'énergie renouvelable est descendante (du pic à la plus faible).

4. <https://docs.google.com/forms/>

5. Site de la CNIL consulté en avril 2022

1. "production" est remplacé par "disponibilité" dans la prochaine étude en ligne décrite.

Les taux de réussite pour chaque question et chaque histogramme sont présentés dans le tableau 6.

Sur la base de l'étude d'Andry et al. [2] sur l'impact de l'ornementation sur les infographies, nous avons mesuré l'esthétique, l'intelligibilité et l'engagement perçus par le biais de questions sur une échelle de Likert à 5 points. Nous avons interrogé les participants sur leurs préférences en termes d'esthétique, d'intérêt et de clarté pour chaque histogramme : histogrammes à barres et histogrammes bio-inspirés. En outre, nous avons demandé aux participants de sélectionner leur histogramme préféré. Les résultats sont présentés dans le tableau 7. Nous n'avons pas posé de question sur la compréhensibilité de l'histogramme en raison de la confusion avec le terme de clarté signalée lors d'un pré-test. Étant donné que nous recrutons un petit nombre de participants et que nous n'avons posé que quatre questions sur le goût esthétique, l'intelligibilité et l'engagement, nous n'analysons que leurs facteurs contributifs : esthétique, clarté, intérêt et préférence.

5.1.2 Résultats. Les histogrammes à barres courbe alterné et à feuilles courbe alterné ont les taux totaux de réussites les plus faibles. Les taux totaux de réussite des histogrammes à barres droits et courbe unilatéraux sont égaux. Le taux total de réussite de l'histogramme à feuilles courbe unilatéral est légèrement plus élevé que les taux de réussite de l'histogramme à feuilles droit unilatéral. Ces taux sont légèrement en deçà de ceux des histogrammes à barres droit et courbe unilatéraux. Le taux de réussite est de 100% pour la question 1 (tâche d'identification du pic) avec les histogrammes à barres droit et courbe unilatéraux et l'histogramme à feuilles courbe unilatéral. Ces résultats sont présentés dans le tableau 6.

Lorsque l'on demande aux participants quel était leur histogramme préféré pour effectuer ces tâches, l'histogramme le plus plébiscité est l'histogramme classique (six des seize participants, soit 37,5%). Ensuite, trois d'entre eux préfèrent l'histogramme à feuilles droit unilatéral et les trois autres préfèrent l'histogramme à feuilles courbe unilatéral. Deux participants préfèrent l'histogramme à barres courbe unilatéral et deux préfèrent les histogrammes à barres courbe alterné et à feuilles courbe alterné. Ces résultats sont présentés dans le tableau 7. En annexes, nous présentons dans les figures 19, 20 et 21 le détails des résultats pour l'évaluation de l'esthétique, de l'intérêt et de la clarté des histogrammes. L'histogramme à feuille courbe alterné a été évalué comme le plus esthétique. Les histogrammes jugés comme les moins esthétiques sont l'histogramme à barres courbe alterné, puis l'histogramme à barres droit unilatéral. L'histogramme à barres droit unilatéral a été évalué comme le plus intéressant suivi par l'histogramme à feuilles droit unilatéral. Les histogrammes jugés comme les moins intéressants sont l'histogramme à feuilles courbe alterné, puis l'histogramme à barres courbe alterné. Enfin, l'histogramme jugé le plus compréhensible est l'histogramme à barres droit unilatéral. Les histogrammes alternés sont jugés les moins compréhensibles.

5.1.3 Analyse des résultats. Davantage de participants ont échoué à réaliser les tâches avec les histogrammes à feuilles qu'avec les histogrammes à barres, sauf dans le cas des feuilles alternées. Cependant, la différence reste faible entre les histogrammes à barres et les histogrammes à feuilles. Un grand nombre de participants ont échoué à réaliser les tâches d'identification des phases croissantes et décroissantes avec des histogrammes alternés. La perte d'efficacité

reste faible entre l'histogramme droit et l'histogramme courbe : cinq échecs (B. histogramme à feuilles droit) contre trois (histogramme à barres droit unilatéral) et quatre échecs (histogramme à feuilles courbe unilatéral) contre trois (histogramme à barres courbe unilatéral). Les histogrammes réunissant les meilleurs taux de réussite pour les trois tâches sont les histogrammes à barres droit et courbe unilatéraux. Les participants n'ont pas systématiquement moins réussi à accomplir les tâches avec les histogrammes courbes qu'avec les histogrammes droits. Le nombre de participants ayant réussi à accomplir les tâches était égal ou supérieur pour les histogrammes droits.

Sans être significatifs, nos résultats rejoignent ceux de Andry et al. [2] concernant les préférences auto-déclarées. Les préférences esthétiques vont aux histogrammes ornements. L'histogramme classique droit a été perçu davantage compréhensible que les autres. Les histogrammes alternés ont été perçus comme moins compréhensibles que les autres. Les préférences esthétiques vont aux histogrammes à feuilles et en particulier aux histogrammes à feuilles alternés. Cependant, dans notre étude les participants ont montré plus d'intérêt pour les histogrammes à feuilles que pour les histogrammes à barres, sauf pour les histogrammes droits ou les participants ont déclaré plus d'intérêt pour l'histogramme à barres droit unilatéral que pour l'histogramme à feuilles droit unilatéral.

Comme les participants ont fait des erreurs avec l'histogramme droit classique, nous supposons que ces erreurs ont été causées par la compréhensibilité des données elles-mêmes ou par des problèmes restants dans la formulation des questions.

5.2 Étude en ligne n°2

Suite aux résultats présentés ci-avant, nous avons choisi de sélectionner un histogramme courbé à feuilles. Nous combinons les histogrammes à feuilles courbe unilatéral et à feuilles courbe alterné, dont l'esthétique a été préféré, afin de concevoir un nouvel histogramme à feuilles symétrique (voir figure 12). L'objectif de cette deuxième étude est de déterminer s'il existe une différence d'efficacité et d'UX entre deux histogrammes ornements : un histogramme ornementé à feuilles et un histogramme ornementé bio-inspiré, plus proche de l'histogramme classique à barres, à bambou.

5.2.1 Méthode. Comme les résultats de l'étude préliminaire semblent montrer que l'ornementation des barres de l'histogramme a un impact faible sur l'efficacité des tâches de lecture simples, nous voulons étudier les effets de deux ornements bio-inspirés différentes. Le premier est un histogramme à feuilles (PlantHISTO) et le second un histogramme dont les barres ont été décorées avec un aspect bambou (BambHISTO). Ces histogrammes sont présentés en figure 12. BambHISTO ornemente les barres de l'histogramme tout en restant droites, ce qui le rend plus proche de l'histogramme à barres que peut l'être PlantHISTO. Dans cette nouvelle étude, nous avons voulu comparer l'efficacité et les qualités pragmatiques et hédoniques de ces deux histogrammes ornements. Nous avons utilisé LimeSurvey⁶ afin de concevoir et déployer notre questionnaire. Nous avons recruté vingt-cinq participants par le biais de listes de diffusion professionnelles d'enseignant-chercheurs et de patrons d'entreprises : 12 femmes, 12 hommes, 0 non-binaire et 1 personne

6. <https://www.limesurvey.org/fr/>

TABLE 6 : Taux de réussite pour chaque histogramme de l'étude n°1 (n=16).

Histogramme	Question 1		Question 2		Question 3		Total	
	Taux	Écart-type	Taux	Écart-type	Taux	Écart-type	Taux	Écart-type
Barres droit unilatéral	100,00%	0	87,50%	0,34	93,75%	0,25	93,75%	0,24
Feuilles droit unilatéral	93,75%	0,25	81,25%	0,40	93,75%	0,25	89,58%	0,31
Barres courbe unilatéral	100,00%	0	87,50%	0,34	93,75%	0,25	93,75%	0,24
Feuilles courbe unilatéral	100,00%	0	87,50%	0,34	87,50%	0,34	91,67%	0,28
Barres courbe alterné	81,25%	0,40	68,75%	0,48	75,00%	0,45	75,00%	0,44
Feuilles courbe alterné	93,75%	0,25	68,75%	0,48	75,00%	0,45	79,17%	0,41

- Nous décrivons ici les tests statistiques (repeated mesures ANOVA et t-test) réalisés avec la bibliothèque Pingouin de Python. Dû à la conjonction du peu de contrôle lors du test et du petit nombre de participants, nous ne les donnons qu'à titre informatif sans les commenter outre mesure.
- Question 1 : $F = 1,71$, $p\text{-unc} = 0,141961 > 0,05$
- Question 2 : $F = 2,26$, $p\text{-unc} = 0,06 > 0,05$
- Question 3 : $F = 2,44$, $p\text{-unc} = 0,04 < 0,05$; Le test de Friedman révèle une différence significative. Cependant, ce n'est pas le cas des t-test deux à deux réalisés. Nous ne pouvons conclure sur le facteur causant cette différence significative.
- Total : $F = 3,25$, $p\text{-unc} = 0,01 < 0,05$; Le test de Friedman révèle une différence significative. C'est également le cas de 4 t-test deux à deux réalisés :
- Histogramme à barres droits unilatéral et Histogramme à barres courbe alterné : $T=2,439934$, $p\text{-value}=0,027581121194511293$; intervalle de confiance à 95% [0,02, 0,34]
- Histogramme à barres droits unilatéral et Histogramme à feuilles courbe alterné : $T=2,1213203435596424$, $p\text{-value}=0,050965849586296075$; intervalle de confiance à 95% [0,0, 0,3]
- Histogramme à barres courbe unilatéral et Histogramme à barres courbe alterné : $T=2,4399343944019005$, $p\text{-value}=0,027581121194511293$; intervalle de confiance à 95% [0,02, 0,34]
- Histogramme à barres courbe unilatéral et Histogramme à feuilles courbe alterné : $T=2,1213203435596424$, $p\text{-value}=0,050965849586296075$; intervalle de confiance à 95% [0,0, 0,3]

TABLE 7 : Résultats des préférences globales par histogramme lors de l'étude n°1 (n=16).

Histogramme	Préférences des Participants	
	Taux	Écart-type
Barres droit unilatéral	37,5% (6)	0,50
Feuilles droit unilatéral	18,75% (3)	0,40
Barres courbe unilatéral	12,5% (2)	0,34
Feuilles courbe unilatéral	18,75% (3)	0,40
Barres courbe alterné	6,25% (1)	0,25
Feuilles courbe alterné	6,25% (1)	0,25

- Nous décrivons ici les tests statistiques (repeated mesures ANOVA) réalisés avec la bibliothèque Pingouin de Python. Dû à la conjonction du peu de contrôle lors du test et du petit nombre de participants, nous ne les donnons qu'à titre informatif sans les commenter outre mesure.
- Total : $F = 1,33$, $p\text{-unc} = 0,26 > 0,05$;

préférant ne pas dévoiler son genre. Ces participants travaillant à plusieurs dans un bureau ou en open-space sont de potentiels utilisateurs finaux de notre système. Nous avons réparti les participants de manière aléatoire dans deux groupes. Tous les participants ont été exposés aux deux conditions (condition BambHISTO, condition PlantHISTO) mais dans un ordre différent selon le groupe auquel ils étaient assignés. Sur la base d'une auto-déclaration, nous nous sommes assurés que les participants de cette nouvelle étude en ligne ne soient pas les mêmes que ceux de la première étude. Après cette déclaration, les participants prennent connaissance du nom et de l'objet du projet dans lequel s'inscrit cette étude, ainsi que les noms et contacts des auteurs de cette étude. Aussi, les droits à la confidentialité des participants sont présentés en suivant le modèle fourni par la CNIL⁷. Ensuite, le contexte d'usage et les consignes sont présentés aux participants tel que présenté en figure 8.

Nous avons formulé les hypothèses suivantes :

H1. BambHISTO est plus efficient que PlantHISTO pour : identifier le pic et la fin de la phase décroissante. Nous posons

cette hypothèse car la forme de BambHISTO est plus proche de celle d'un histogramme à barres classiques.

H2. BambHISTO a des qualités pragmatiques supérieures à l'histogramme-feuilles pour : identifier le pic et la fin de la phase décroissante. Nous posons cette hypothèse car lors de la précédente étude, les participants ont préféré un histogramme classique pour réaliser les tâches.

H3. PlantHISTO a des qualités hédoniques supérieures à celles de BambHISTO pour : identifier le pic et la fin de la phase décroissante. Nous posons cette hypothèse car nous supposons que l'aspect plus naturel de PlantHISTO et de son animation supporte davantage les qualités hédoniques de l'histogramme que BambHISTO.

H4. PlantHISTO a des qualités UX globales plus élevées que BambHISTO pour : identifier le pic et la fin de la phase décroissante. Nous posons cette hypothèse car nous supposons que suite à la reconception de PlantHISTO, la préférence des utilisateurs ira à une ornementation plus artistique que la version ornementée plus proche d'un histogramme classique.

Nous mesurons l'efficacité par le taux de réussite des participants pour identifier le pic, la phase croissante et la phase décroissante de l'histogramme. Nous mesurons les qualités hédoniques et pragmatiques à l'aide du questionnaire UEQ-S [46]. En plus de cela, nous nous sommes interrogés sur les préférences esthétiques des participants concernant BambHISTO et PlantHISTO et deux conceptions variantes présentant les données de manière unilatérale (voir figure 16). Ainsi, nous posons l'hypothèse additionnelle suivante : H5. PlantHISTO a des qualités esthétiques supérieures à BambHISTO et leur variantes, car nous supposons qu'une ornementation plus artistique à l'aspect plus naturel sera davantage plébiscité pour ces qualités esthétiques.

Pour chacune des questions posées basées sur un scénario (voir figure 8), nous affichons un rappel des instructions (voir figure 13). L'objectif ici est de résoudre les éventuels problèmes restants concernant la compréhension des données et leur contextualisation par rapport à l'objectif de décalage de la demande énergétique.

7. Site de la CNIL consulté en juin 2022

Comme pour le premier questionnaire, nous demandons aux participants de trouver le pic de disponibilité sur l'histogramme. Ensuite, au lieu de demander de trouver toutes les heures pour lesquelles la disponibilité des énergies renouvelables augmente et diminue, nous demandons aux utilisateurs de sélectionner l'heure à laquelle ils doivent brancher leur ordinateur portable et l'heure à laquelle ils doivent le débrancher sur la base d'un court scénario. Les questions relatives sont listées dans le tableau 8. Les participants devaient lancer l'animation de l'histogramme avant de répondre à la question. La liste déroulante de réponse était désactivée si l'animation n'était pas lancée. L'animation montre le déploiement ou le repliement des feuilles ou bambous de l'histogramme, heure par heure, de 8h à 17h59. Pour la première question (Q1), l'histogramme présente une seule variation de la disponibilité des énergies renouvelables pour la journée. Puis, pour la deuxième (Q2), la troisième (Q3) question et la quatrième (Q4), l'histogramme présente deux variations pour la journée. La première est affichée pour répondre à la deuxième question (Q2). La deuxième variation du jour est affichée pour répondre à la troisième question (Q3) et à la quatrième question (Q4). De plus, à la fin des trois questions dans chaque condition, nous avons demandé à chaque participant de remplir un questionnaire UEQ-S [46]. Enfin, nous avons laissé la possibilité aux participants de renseigner des remarques concernant les histogrammes, le questionnaire en lui-même, les consignes et leurs illustrations.

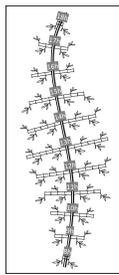


FIGURE 10 :
BambHISTO

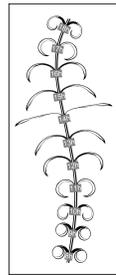


FIGURE 11 :
PlantHISTO

FIGURE 12 : Les deux histogrammes utilisés en première partie de l'étude n°2

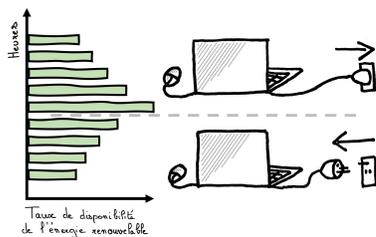
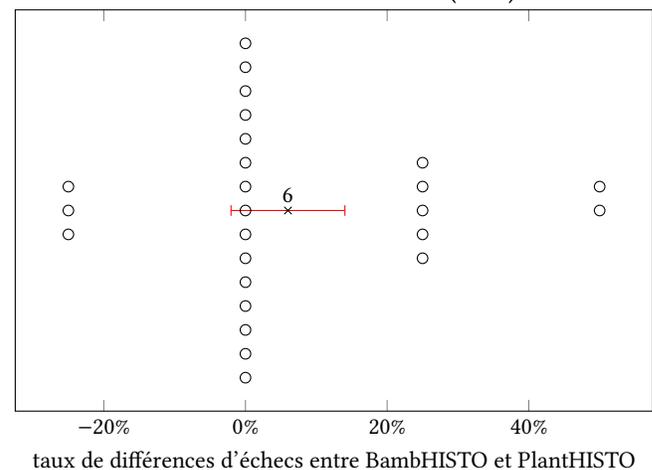


FIGURE 13 : Rappel des instructions indiquant quand brancher et débrancher l'ordinateur portable en fonction de la disponibilité de l'énergie renouvelable lors de l'étude n°2.

5.2.2 *Résultats Quantitatifs*. Comme le montre le tableau 9, davantage de participants ont échoué à réaliser les tâches dans la condition BambHISTO que dans la condition PlantHISTO, sauf pour la dernière tâche. Pour la première et la deuxième tâche, deux participants ont échoué avec BambHISTO et aucun participant n'a échoué avec PlantHISTO. Pour la troisième question, six participants ont échoué avec BambHISTO et trois participants ont échoué avec PlantHISTO. Pour la dernière question, trois participants ont échoué avec BambHISTO contre quatre participants ont échoué avec PlantHISTO. Ainsi, sept participants ont échoué à identifier la fin de la phase croissante (le pic) de la disponibilité d'énergie renouvelable avec BambHISTO à l'une des questions Q1, Q2 ou Q4 contre 4 avec PlantHISTO. Six participants ont échoué à identifier la fin de la phase décroissante (Q3) de la disponibilité d'énergie renouvelable avec BambHISTO contre trois avec PlantHISTO.

Concernant les préférences des utilisateurs, les résultats des questionnaires UEQ-S générés avec son outil d'analyse⁸ sont présentés dans la figure 17. D'après le repère fourni par l'outil, les qualités pragmatiques des deux histogrammes sont mauvaises, et leurs qualités hédoniques sont supérieures à la moyenne. Leurs qualités UX globales sont inférieures à la moyenne. Les qualités pragmatiques de BambHISTO sont légèrement supérieures aux qualités pragmatiques de PlantHISTO. Cependant, comme indiqué précédemment, les participants ont davantage échoué à identifier le pic et la fin de la phase décroissante avec BambHISTO qu'avec PlantHISTO. Les qualités hédoniques de l'histogramme feuilles sont légèrement supérieures aux qualités pragmatiques de BambHISTO. Les qualités UX globales des deux histogrammes sont égales.

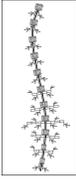
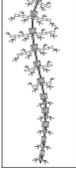
FIGURE 14 : Questionnaire 2 : Efficacité - Comparaison pour chaque participant du taux d'échecs entre la condition BambHISTO et PlantHISTO (n=25).



Enfin, nous avons demandé aux utilisateurs de classer les histogrammes du plus beau au plus laid. Nous avons ajouté aux histogrammes présentés ci-avant deux histogrammes étant les versions affichant seulement sur leur côté droit les taux de disponibilités d'énergie renouvelable. Les histogrammes utilisés sont présentés

8. <https://www.ueq-online.org/>

TABLE 8 : Questions de l'étude en ligne n°2

	Condition : BambHISTO	Fin de l'animation	Condition : PlantHISTO	Fin de l'animation
Q1	Conformément aux consignes, vous avez débranché votre ordinateur portable au début de votre journée à 8h30. A quelle heure allez-vous le rebrancher ?		Conformément aux consignes, vous avez débranché votre ordinateur portable au début de votre journée à 9h. A quelle heure allez-vous le rebrancher ?	
Q2	Conformément aux consignes, vous avez débranché votre ordinateur portable au début de votre journée à 9h00. A quelle heure allez-vous le rebrancher ?		Conformément aux consignes, vous avez débranché votre ordinateur portable au début de votre journée à 8h30. A quelle heure allez-vous le rebrancher ?	
Q3	Votre ordinateur portable se recharge rapidement, à 13h00 la batterie indique 100% de charge. Selon les consignes et l'histogramme, à partir de quelle heure allez-vous débrancher votre ordinateur portable ?		Votre ordinateur portable se recharge rapidement, à 14h00 la batterie indique 100% de charge. Selon les consignes et l'histogramme, à partir de quelle heure allez-vous débrancher votre ordinateur portable ?	
Q4	Selon les consignes et l'histogramme, à partir de quelle heure allez-vous rebrancher votre ordinateur portable ?		Selon les consignes et l'histogramme, à partir de quelle heure allez-vous rebrancher votre ordinateur portable ?	

– Pour les questions Q1 et Q2, nous rappelons que nous considérons que la batterie permet de travailler sans alerte de batterie faible pendant 5h.

TABLE 9 : Taux de réussite et écart-types (SD) pour chaque histogramme de l'étude n°2 (n=25).

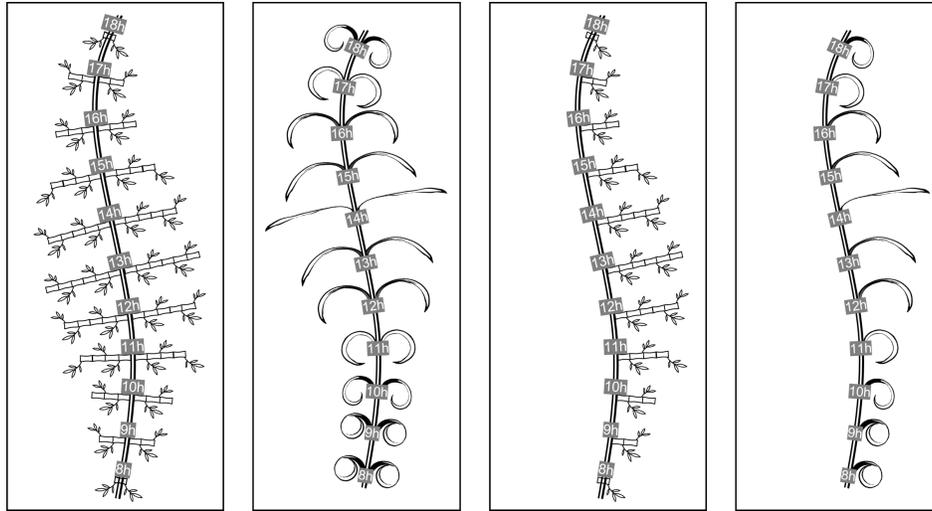
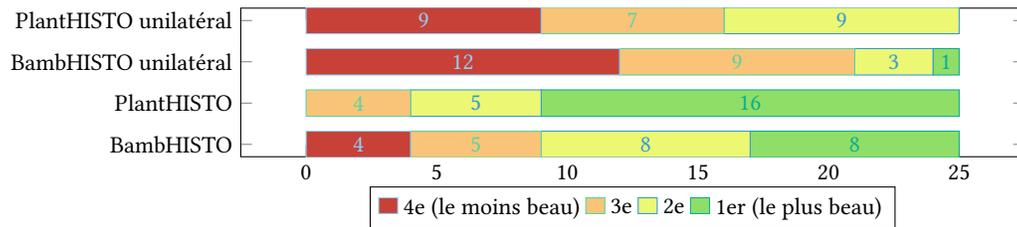
Cond.	Question 1		Question 2		Question 3		Question 4		Total	
	Taux	SD	Taux	SD	Taux	SD	Taux	SD	Taux	SD
BambH.	92,00%	0,28	92,00%	0,28	76,00%	0,44	88,00%	0,33	87,00%	0,38
PlantH.	100,00%	0	100,00%	0	88,00%	0,33	84,00%	0,37	93,00%	0,26

en figure 16. Les résultats sont présentés en figure 15. PlantHISTO a été classé seize fois comme étant le plus beau des histogrammes présentés contre huit fois pour BambHISTO. PlantHISTO n'a jamais été classé en dernier contrairement à BambHISTO qui l'a été quatre fois. Les histogrammes unilatéraux ont été moins appréciés que les histogrammes bilatéraux.

5.2.3 Retours des participants. Nous avons recueilli les commentaires des participants. Ces commentaires sont illustrés en figure 18 et détaillés ci-après.

Certains participants ont souligné la lisibilité de BambHISTO malgré davantage d'échecs à réaliser les tâches avec celui-ci : "L'histogramme à bambou est plus lisible que l'histogramme feuille", ou encore : "L'histogramme à 'carrés' [BambHISTO] semble moins fluide mais offre une meilleure visibilité des informations que l'on recherche

(grâce à la présence des cases). L'histogramme 'feuille' est plutôt sympa, même s'il est moins 'user-friendly' que l'autre version". Nous avons quelques retours sur le design des histogrammes à propos de leurs couleurs : "La forme de l'histogramme couplée à une source lumineuse (verte ou orange par exemple) peut aider à la visualisation des 'bonnes périodes' et ainsi faciliter la prise de décision de l'utilisateur", ou encore : "Ajouter un code couleur pour brancher et débrancher". Ensuite, un participant suggère d'explorer différentes vitesses d'animation : "Un test sur la vitesse d'ouverture des branches ou des feuilles pourrait être intéressant". Enfin, à propos des histogrammes présentés en figure 16, un participant déclare que "Les demi-histogrammes [unilatéraux] enlèvent une partie de l'information qui est importante, cela ne simplifie pas la compréhension". Un autre écrit : "Ayant une forte sensibilité envers la botanique, j'ai du

FIGURE 15 : Classement esthétique (en nombre de votes) des histogrammes lors de l'étude n°2 (n=25).**FIGURE 16 : Les versions d'histogrammes comparés en deuxième partie de l'étude n°2.**

mal avec les 'plantes' qui ne poussent que d'un seul côté et je trouve les histogrammes symétriques bien plus sympas et jolis".

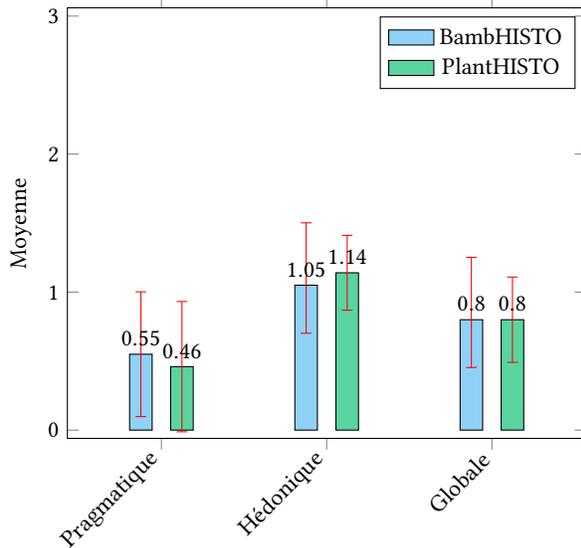
5.2.4 Analyse des Résultats. Un t-test pour échantillons appariés suggère qu'il n'y a pas de différence significative entre l'identification incorrecte des pics et des fins de phases décroissantes entre la condition BambHISTO et PlantHISTO ($T=1.541$, $p\text{-value}=.14 > .05$, intervalle de confiance à 95% = $[-2.04, 14.04]$). Ces résultats sont présentés en figure 14. Les résultats étant non-significatifs, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle et conclure sur l'hypothèse H1. Cependant, le taux de réussite des tâches est moindre avec BambHISTO.

Un test de Wilcoxon pour échantillons appariés suggère qu'il n'y a pas de différence significative entre les qualités pragmatiques ($T=127.0$, $p\text{-value}=.74$, variance de la différence sur l'échantillon = 2,02), hédoniques ($T=80.0$, $p\text{-value}=.34$, variance de la différence sur l'échantillon = 0,25) et d'UX globale ($T=96.5$, $p\text{-value}=.75$, variance de la différence sur l'échantillon = 0,71) entre BambHISTO et PlantHISTO. De la même manière, nous ne pouvons pas rejeter les hypothèses nulles et conclure sur les hypothèses H2, H3 et H4. Les différentes ornementsations n'impactent pas significativement les qualités pragmatiques, hédoniques et globales des histogrammes. Les qualités pragmatiques de BambHISTO restent faibles (mauvaises). Les qualités hédoniques de PlantHISTO sont au-dessus de la moyenne. Les qualités UX globales sont égales pour les deux

histogrammes. Ces qualités UX globales restent faibles. Nous supposons que ces faibles résultats sont dus au niveau de fidélité des prototypes et à leur faible niveau d'interactivité.

Cependant, bien que la différence entre les qualités hédoniques de BambHISTO et PlantHISTO ne soit pas significative, l'ornementation impacte significativement la préférence esthétique parmi les histogrammes présentés en figure 16. Nous avons ramené le classement de chaque histogramme par les participants comme une note de 0 à 3. Un test de Friedman révèle une différence significative entre l'esthétique de BambHISTO, PlantHISTO et leur variantes unilatérales ($F=28.632$, $p\text{-value}=.0000027 < .05$). Des tests de Wilcoxon révèlent une différence significative entre le classement esthétique de PlantHISTO et BambHISTO unilatéral ($p\text{-value}=.000038$, variance de la différence sur l'échantillon = 2,36) et de PlantHISTO et PlantHISTO unilatéral ($p\text{-value}=.000000596$, variance de la différence sur l'échantillon = 0,34). Cependant, la différence entre le classement esthétique de PlantHISTO et BambHISTO n'est pas significative ($p\text{-value}=.067$, variance de la différence sur l'échantillon = 2,89) en cohérence avec les résultats précédents. Enfin, d'autres différences significatives ont été identifiées entre le classement esthétique de BambHISTO unilatéral en BambHISTO ($p\text{-value}=0.00038$, variance de la différence sur l'échantillon = 1,41) et de BambHISTO et PlantHISTO unilatéral ($p\text{-value}=.05$, variance de la différence sur l'échantillon = 3,58). En conséquence, l'hypothèse H5 est partiellement validée, PlantHISTO a été préféré pour ses

FIGURE 17 : Résultats UEQ-S de l'étude n°2.



qualités esthétiques davantage que les variations unilatérales de BambHISTO et PlantHISTO. PlantHISTO a davantage été classé comme étant un plus bel histogramme que BambHISTO.

Certains participants plébiscitent la lisibilité de BambHISTO, malgré un taux de réussite moindre pour celui-ci. Nous retrouvons également des commentaires à propos des qualités esthétiques de PlantHISTO. Ces commentaires appuient les résultats précédents. Les versions unilatérales des histogrammes n'ayant pas été bien classées pour leurs qualités esthétiques, ni plébiscités dans les commentaires, nous choisissons de ne pas explorer davantage ces variations de conception. Nous avons décidé d'itérer avec l'histogramme bio-inspiré à feuilles : PlantHISTO. Nous y apportons deux nouvelles variables visuelles : couleur, luminosité et saturation afin de représenter respectivement le pic, l'heure courante et les taux concernant la variation de disponibilité courante, les taux à considérer ou non pour la variation courante et enfin le nombre d'utilisateur utilisant l'énergie renouvelable disponible. Le résultat des séances de reprototypage est présenté en figure 6.

6 LIMITATIONS

Les études présentées ont été menées sous forme de questionnaire en ligne afin de faciliter la passation en période de pandémie et par gain de temps. Ainsi, elles présentent les limitations inhérentes à de telles études. Bien que nous ayons ajouté des sections permettant aux participants de s'exprimer librement sur les prototypes présentés et le questionnaire en lui-même dans la seconde étude, le mode d'administration nous empêche d'instiguer en profondeur les réponses des participants. Par exemple, nous ne savons pas expliquer pourquoi davantage d'échecs ont été observés avec un histogramme ornementé (BambHISTO) dont la forme reste proche

d'un histogramme classique et dont la lisibilité a été soulignée dans les commentaires des participants. Bien que le choix de conception concernent à la fois la version graphique et tangible de l'interface que nous concevons, nous n'avons testé que des prototypes basses fidélité en 2D de ces interfaces. Ainsi, si nous pouvons assurer que l'interface graphique pourra être utilisée pour atteindre un but de décalage énergétique, nous pouvons difficilement élargir ces résultats à la version tangible de l'interface sans de nouvelles études utilisateurs complémentaires. Enfin, si ces études peu coûteuses à développer nous ont permis d'orienter rapidement nos choix de conception, des études utilisateurs en milieu contrôlé restent à mener afin d'approfondir nos résultats avec des prototypes de plus haute-fidélité. Aussi et bien que certains facteurs des propriétés d'utilisabilité et d'UX doivent être supportés par les systèmes persuasifs [32] (par exemple : facilité d'utilisation, attractivité, qualité de l'information), les études présentées ne permettent pas de conclure sur l'aspect persuasif du système afin d'accompagner un changement de comportement. Également, l'utilisation du système et donc de la réalisation de la nouvelle pratique sera soumise aux dynamiques, pressions et routines des groupes d'utilisateurs sur le lieu de travail. Ces points feront l'objet d'une future étude longitudinale [3].

7 TRAVAUX FUTURS ET CONCLUSION

Afin de réaliser les tâches d'identification d'un pic de disponibilité d'énergie renouvelable et la forme de la variation, nous avons déterminé qu'un histogramme ornementé sous la forme d'un histogramme à feuilles peut être utilisé car la perte d'efficacité est faible. Suite aux résultats du premier questionnaire, nous avons retenu une conception bio-inspirée et courbée de l'histogramme. Nous avons, en partie, résolu la perte d'efficacité en contextualisant les données et en présentant clairement les instructions, comme le montre le deuxième questionnaire en ligne. Nous avons proposé un questionnaire contextualisant les questions grâce à ce mini-scénario. Que ce soit dans la condition BambHISTO ou PlantHISTO le taux de réussite de réalisation des tâches reste élevé (respectivement 87% et 93% au total) alors que nous n'utilisons que des prototypes en noir et blanc. Nous avons exploré l'efficacité et l'UX de deux conceptions bio-inspirées et courbées d'histogrammes animés : PlantHISTO et BambHISTO. L'ornementation de l'histogramme n'a pas d'impact significatif sur l'efficacité, les qualités pragmatiques et hédoniques. Nous observons une faible différence du taux de réussite en faveur de PlantHISTO. Les qualités pragmatiques d'un design plus proche de l'histogramme à barres sont faiblement supérieures à celles de PlantHISTO. Les qualités hédoniques de PlantHISTO sont faiblement supérieures à celle d'un histogramme à barres. Dans nos conditions de tests, les qualités UX globales n'ont pas été affectées par l'ornementation de l'histogramme.

Nous avons pu montrer qu'une visualisation artistique de données via un histogramme ornementé utilisant une métaphore bio-inspirée est possible : les utilisateurs sont capables d'identifier le pic de production d'énergie renouvelable sur ce type d'histogramme afin de décaler de la demande énergétique d'un appareil sur batterie type ordinateur portable. Nous avons présenté le processus itératif centré utilisateur suivi employant des méthodes et outils favorisant la rapidité et ayant l'avantage d'être peu coûteux.

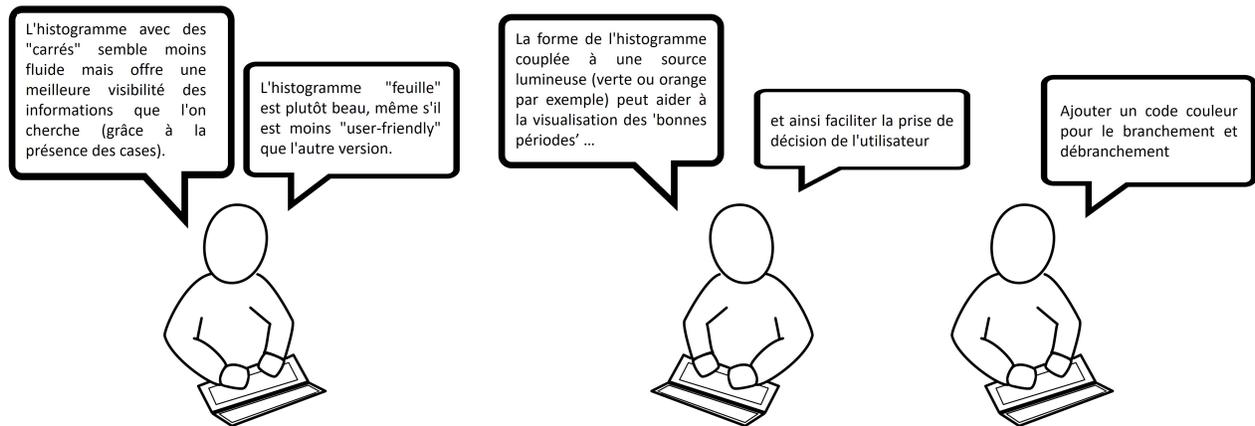


FIGURE 18 : Commentaires libres des participants collectés lors de l'étude n°2.

Dans de futurs travaux [3], nous proposons d'étudier l'impact de la modalité de présentation sur l'engagement des utilisateurs dans une pratique environnementale partagée soutenue par un système. Nous nous attacherons à étudier les scénarios où plusieurs pics de disponibilités sont présents afin de réduire la difficulté des utilisateurs à identifier l'heure à laquelle il ne doivent plus consommer d'énergie afin de maximiser l'utilisation d'énergie renouvelable. Également, nous étudierons l'engagement dans la durée dans un tel comportement. Ainsi, nous combinerons des techniques longitudinales et rétrospectives dans une future étude sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- [1] Adrian K. Clear and Rob Comber. 2017. *Towards a social practice theory perspective on sustainable HCI research and design*. Routledge. https://doi.org/10.9774/gleaf.9781315465975_6 Pages : 31-43 Publication Title : Digital Technology and Sustainability.
- [2] Tiffany Andry, Christophe Hurter, François Lambotte, Pierre Fastrez, and Alexandru Telea. 2021. Interpreting the Effect of Embellishment on Chart Visualizations. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–15. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445739>
- [3] Elodie Bouzekri and Guillaume Rivière. 2022. Tangibility and Engagement in Environmental Behavior : Toward a Longitudinal Study. ACM. <https://doi.org/10.1145/3502178.3529110>
- [4] Christina Bremer, Bran Knowles, and Adrian Friday. 2022. Have We Taken On Too Much? : A Critical Review of the Sustainable HCI Landscape. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3491102.3517609>
- [5] M. L. Chalal, B. Medjdoub, N. Bezaï, R. Bull, and M. Zune. 2022. Visualisation in energy eco-feedback systems : A systematic review of good practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162 (July 2022), 112447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112447>
- [6] Michelle Chang, Chenyi Shen, Aditi Maheshwari, Andreea Danielescu, and Lining Yao. 2022. Patterns and Opportunities for the Design of Human-Plant Interaction. In *Designing Interactive Systems Conference (DIS '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 925–948. <https://doi.org/10.1145/3532106.3533555>
- [7] Jaewon Cho, Junwoo Yoo, Ju-young Shin, Jun-dong Cho, and Andrea Bianchi. 2017. Quantifying Children's Engagement with Educational Tangible Blocks. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 389–395. <https://doi.org/10.1145/3024969.3025062>
- [8] Joëlle Coutaz, Antonin Carlesso, Nicolas Bonnefond, Raffaella Balzarini, Yann Laurillau, Nadine Mandran, and James L. Crowley. 2018. "Will the Last One Out, Please Turn off the Lights" : Promoting Energy Awareness in Public Areas of Office Buildings. In *Ambient Intelligence (Lecture Notes in Computer Science)*, Achilles Kameas and Kostas Stathis (Eds.). Springer International Publishing, Cham, 20–36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03062-9_2
- [9] Maxime Daniel and Guillaume Rivière. 2021. Exploring Axisymmetric Shape-Change's Purposes and Allure for Ambient Display : 16 Potential Use Cases and a Two-Month Preliminary Study on Daily Notifications. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 47, 6 pages.
- [10] Maxime Daniel, Guillaume Rivière, and Nadine Couture. 2019. CairnFORM : A Shape-Changing Ring Chart Notifying Renewable Energy Availability in Peripheral Locations. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 275–286. <https://doi.org/10.1145/3294109.3295634>
- [11] Maxime Daniel, Guillaume Rivière, and Nadine Couture. 2020. A shape-changing cylindrical chart that displays energy availability forecasts. *Journal d'Interaction Personne-Système* Volume 9, Number 1, Special Issue "Persuasive Interaction for Sustainability" (Jan. 2020), 7102. <https://doi.org/10.46298/jips.7102>
- [12] Maxime Daniel, Guillaume Rivière, Nadine Couture, and Stéphane Kreckelbergh. 2016. An analysis of persuasive technologies for energy demand side management. In *Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine on - IHM '16*. ACM Press, Fribourg, Switzerland, 197–210. <https://doi.org/10.1145/3004107.3004111>
- [13] Tawanna R. Dillahunt and Jennifer Mankoff. 2014. Understanding factors of successful engagement around energy consumption between and among households. In *Proceedings of the 17th ACM conference on Computer supported cooperative work & social computing*. ACM, Baltimore Maryland USA, 1246–1257. <https://doi.org/10.1145/2531602.2531626>
- [14] Nikos Dimitriou, Anastasia Garbi, Kostas Vasilakis, Anthony Schoofs, Amr Taha, Manolis Nikiforakis, Sarantis Kotsilitis, Thanasis G. Papaioannou, Dimosthenis Kotsopoulos, Cleopatra Bardaki, Fabian Pursche, and Nikolay Deliyski. 2018. 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)*. IEEE, Athens, 65–70. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480290>
- [15] Eiman Y. Elbanhawy, Andrew F. G. Smith, and John Moore. 2016. Towards an ambient awareness interface for home battery storage system. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing : Adjunct (UbiComp '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1608–1613. <https://doi.org/10.1145/2968219.2968557>
- [16] Maily Fidler, Sharon Tan, Samar Alqatari, Nishant Bhansali, Alex Chang, Mia Davis, Eric Kofman, Krystal Lee, Phounsouk Sivilay, Marilyn Cornelius, Brendan Wypich, and Banny Banerjee. 2012. Sensor-based physical interactions

- as interventions for change in residential energy consumption. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2129–2134. <https://doi.org/10.1145/2212776.2223764>
- [17] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 2013. inFORM : dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 417–426. <https://doi.org/10.1145/2501988.2502032>
- [18] Jon Froehlich, Leah Findlater, and James Landay. 2010. The design of eco-feedback technology. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1999–2008. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753629>
- [19] Anton Gustafsson and Magnus Gyllenswård. 2005. The power-aware cord : energy awareness through ambient information display. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '05)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1423–1426. <https://doi.org/10.1145/1056808.1056932>
- [20] Stefanie Harbich and Marc Hassenzahl. 2011. Using behavioral patterns to assess the interaction of users and product. *International Journal of Human-Computer Studies* 69, 7 (2011), 496–508. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2011.03.003>
- [21] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, and Jean-Daniel Fekete. 2013. Evaluating the efficiency of physical visualizations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2593–2602. <https://doi.org/10.1145/2470654.2481359>
- [22] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, Petra Isenberg, Jason Alexander, Abhijit Karnik, Johan Kildal, Sriram Subramanian, and Kasper Hornbæk. 2015. Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, Seoul Republic of Korea, 3227–3236. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702180>
- [23] Charlene Jennett, Ioanna Iacovides, Anna L. Cox, Anastasia Vikhanova, Emily Weigold, Layla Mostaghimi, Geraint Jones, James Jenkins, Sarah Gallacher, and Yvonne Rogers. 2016. Squeezy Green Balls : Promoting Environmental Awareness through Playful Interactions. In *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play (CHI PLAY '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 389–400. <https://doi.org/10.1145/2967934.2968102>
- [24] Rikke Hagensby Jensen, Dimitrios Raptis, Jesper Kjeldskov, and Mikael B. Skov. 2018. Washing with the Wind : A Study of Scripting towards Sustainability. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference (DIS '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1387–1400. <https://doi.org/10.1145/3196709.3196779>
- [25] Evangelos Karapanos, John Zimmerman, Jordi Forlizzi, and Jean-Bernard Martens. 2009. User experience over time : an initial framework. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*. ACM, New York, NY, USA, 729–738. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518814>
- [26] Cecilia Katzeff, Looe Broms, Li Jönsson, Ulrika Westholm, and Minna Räsänen. 2013. Exploring Sustainable Practices in Workplace Settings through Visualizing Electricity Consumption. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 20, 5 (Nov. 2013), 31 :1–31 :22. <https://doi.org/10.1145/2501526>
- [27] Tanyoung Kim, Hwajung Hong, and Brian Magerko. 2009. Coralog : use-aware visualization connecting human micro-activities to environmental change. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '09)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 4303–4308. <https://doi.org/10.1145/1520340.1520657>
- [28] Jesper Kjeldskov, Mikael B. Skov, Jeni Paay, Dennis Lund, Tue Madsen, and Michael Nielsen. 2015. Facilitating Flexible Electricity Use in the Home with Eco-Feedback and Eco-Forecasting. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction (OzCHI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 388–396. <https://doi.org/10.1145/2838739.2838755>
- [29] Tengfei Liu, Xianghua Ding, Peng Liu, Tun Lu, and Ning Gu. 2016. ArchiExpression : A Physical Eco-Feedback Display in an Outdoor Campus Space of China. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Chinese CHI (ChineseCHI2016)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–10. <https://doi.org/10.1145/2948708.2948711>
- [30] Jennifer C. Mankoff, Eli Blevis, Alan Borning, Batya Friedman, Susan R. Fussell, Jay Hasbrouck, Allison Woodruff, and Phoebe Sengers. 2007. Environmental Sustainability and Interaction. In *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (San Jose, CA, USA) (CHI EA '07)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2121–2124. <https://doi.org/10.1145/1240866.1240963>
- [31] Valentina Nisi, Nuno Jardim Nunes, Filipe Quintal, and Mary Barreto. 2013. SINAIS from Fanal : design and evaluation of an art-inspired eco-feedback system. In *Proceedings of the Biannual Conference of the Italian Chapter of SIGCHI on - CHIItaly '13*. ACM Press, Trento, Italy, 1–10. <https://doi.org/10.1145/2499149.2499151>
- [32] Harri Oinas-Kukkonen and Marja Harjumaa. 2009. Persuasive Systems Design : Key Issues, Process Model, and System Features. *Communications of the Association for Information Systems* 24, 1 (March 2009). <https://doi.org/10.17705/1CAIS.02428>
- [33] Pascal Paillé and Olivier Boiral. 2013. Pro-environmental behavior at work : Construct validity and determinants. *Journal of Environmental Psychology* 36 (Dec. 2013), 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.07.014>
- [34] Lucas Pereira and Nuno Nunes. 2020. Understanding the practical issues of deploying energy monitoring and eco-feedback technology in the wild : Lesson learned from three long-term deployments. *Energy Reports* 6 (Nov. 2020), 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.025>
- [35] Lara S. G. Piccolo, Cecília Baranauskas, and Rodolfo Azevedo. 2017. A socially inspired energy feedback technology : challenges in a developing scenario. *AI & SOCIETY* 32, 3 (Aug. 2017), 383–399. <https://doi.org/10.1007/s00146-016-0653-8>
- [36] James Pierce and Eric Paulos. 2012. The local energy indicator : designing for wind and solar energy systems in the home. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference (DIS '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 631–634. <https://doi.org/10.1145/2317956.2318050>
- [37] Fabio Pittarello and Lorenzo Brutti. 2019. A public tangible interface for engaging and informing young citizens about climate change. In *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays (PerDis '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3321335.3324938>
- [38] Isabel P. S. Qamar, Katarzyna Stawarz, Simon Robinson, Alix Goguet, Céline Coutrix, and Anne Roudaut. 2020. Morphino : A Nature-Inspired Tool for the Design of Shape-Changing Interfaces. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1943–1958.
- [39] Filipe Quintal, Augusto Esteves, Fábio Caires, Vítor Baptista, and Pedro Mendes. 2019. Wattom : A Consumption and Grid Aware Smart Plug with Mid-air Controls. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 307–313. <https://doi.org/10.1145/3294109.3295642>
- [40] Filipe Quintal, Clinton Jorge, Valentina Nisi, and Nuno Nunes. 2016. Watt-I-See : A Tangible Visualization of Energy. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 120–127. <https://doi.org/10.1145/2909132.2909270>
- [41] He Ren and Eva Hornecker. 2021. Comparing Understanding and Memorization in Physicalization and VR Visualization. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3430524.3442446>
- [42] Thomas Rist, Steffen Wendzel, Masood Masoodian, and Elisabeth André. 2012. Next-Generation Home Automation Systems. In *Usability Day X*. Dornbirn, Austria, 9.
- [43] Johnny Rodgers and Lyn Bartram. 2011. Exploring Ambient and Artistic Visualization for Residential Energy Use Feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17, 12 (Dec. 2011), 2489–2497. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.196> Conference Name : IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.
- [44] Kim Sauvé, Saskia Bakker, and Steven Houben. 2020. Econundrum : Visualizing the Climate Impact of Dietary Choice through a Shared Data Sculpture. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1287–1300. <https://doi.org/10.1145/3357236.3395509>
- [45] Mette Muxoll Schou and Anders Sundnes Løvlie. 2021. The Diary of Niels : Affective Engagement Through Tangible Interaction with Museum Artifacts. In *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage : Documentation, Preservation, and Protection (Lecture Notes in Computer Science)*, Marinos Ioannides, Eleanor Fink, Lorenzo Cantoni, and Erik Champion (Eds.). Springer International Publishing, Cham, 289–299. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73043-7_24
- [46] Martin Schrepp, Andreas Hinderks, and Jörg Thomaschewski. 2017. Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 4, 6 (2017), 103. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.09.001>
- [47] Olivia Seow, Cedric Honnet, Simon Perrault, and Hiroshi Ishii. 2022. Pudica : A Framework For Designing Augmented Human-Flora Interaction. In *Augmented Humans 2022*. ACM, Kashiwa, Chiba Japan, 40–45. <https://doi.org/10.1145/3519391.3519394>
- [48] Will Simm, Maria Angela Ferrario, Adrian Friday, Peter Newman, Stephen Forshaw, Mike Hazas, and Alan Dix. 2015. Tiree Energy Pulse : Exploring Renewable Energy Forecasts on the Edge of the Grid. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1965–1974. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702285>
- [49] Jim Skea, Priyadarshi Shukla, Andy Reisinger, Raphael Slade, Minal Pathak, Alaa Al Khourdajie, Renee van Diemen, Amjad Abdulla, Keigo Akimoto, Mustafa

- Babiker, Quan Bai, Igor Bashmakov, Chris Bataille, Göran Berndes, Gabriel Blanco, Kornelis Blok, Mercedes Bustamante, Edward Byers, Luisa Cabeza, and Harald Winkler. 2022. *Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [50] Brigitte Stegers, Kim Sauvé, and Steven Houben. 2022. Ecorbis : A Data Sculpture of Environmental Behavior in the Home Context. In *Designing Interactive Systems Conference (DIS '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1669–1683. <https://doi.org/10.1145/3532106.3533508>
- [51] Simon Stusak, Moritz Hobe, and Andreas Butz. 2016. If Your Mind Can Grasp It, Your Hands Will Help. In *Proceedings of the TEI '16 : Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 92–99. <https://doi.org/10.1145/2839462.2839476>
- [52] Simon Stusak, Jeannette Schwarz, and Andreas Butz. 2015. Evaluating the Memorability of Physical Visualizations. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3247–3250. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702248>
- [53] Faisal Taher, John Hardy, Abhijit Karnik, Christian Weichel, Yvonne Jansen, Kasper Hornbæk, and Jason Alexander. 2015. Exploring Interactions with Physically Dynamic Bar Charts. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3237–3246. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702604>
- [54] Thomas Vilarinho, Babak Farshchian, Leendert W.M. Wienhofen, Thomas Franng, and Håkon Gulbrandsen. 2016. Combining Persuasive Computing and User Centered Design into an Energy Awareness System for Smart Houses. In *2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE)*. 32–39. <https://doi.org/10.1109/IE.2016.14>
- [55] Lesley Xie, Alissa N. Antle, and Nima Motamedi. 2008. Are tangibles more fun? comparing children's enjoyment and engagement using physical, graphical and tangible user interfaces. In *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '08)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 191–198. <https://doi.org/10.1145/1347390.1347433>

A RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EN LIGNE N°1

Dans ces annexes, nous complétons les résultats présentés de l'étude n°1 dans le corps du texte de l'article visant à évaluer l'efficacité, l'esthétique, l'intérêt et la compréhensibilité des histogrammes : à barres droit unilatéral, à feuilles droit unilatéral, à barres courbe unilatéral, à feuilles courbe unilatéral, à barres courbe alterné et à feuilles courbe alterné. Le lecteur peut trouver les résultats de l'évaluation de l'esthétique (figure 19), de l'intérêt (figure 20) et de la compréhensibilité (figure 21) des différents histogrammes.

FIGURE 19 : Résultats de l'évaluation de l'esthétique des histogrammes de l'étude n°1 (n=16). Réponses sous forme d'une échelle de Likert à "Je trouve la visualisation belle".

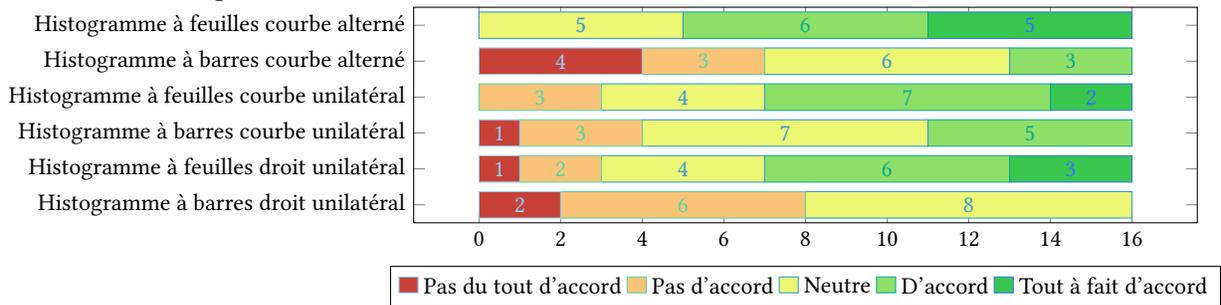


FIGURE 20 : Résultats de l'évaluation de l'intérêt porté aux histogrammes de l'étude n°1 (n=16). Réponses sous forme d'une échelle de Likert à "Je trouve la visualisation intéressante".

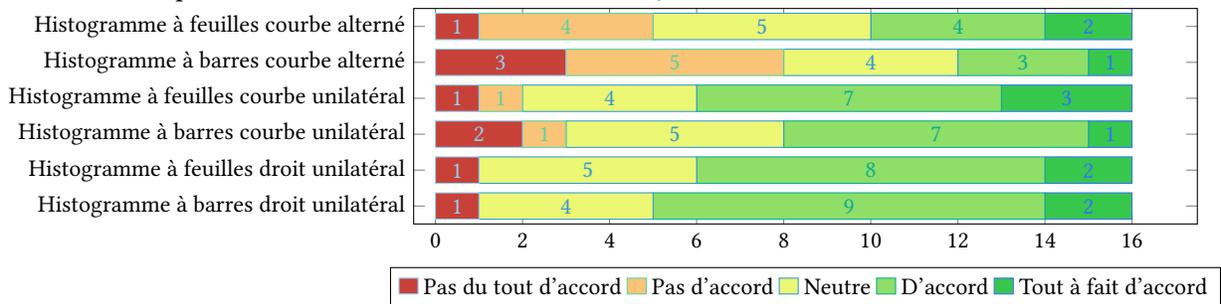


FIGURE 21 : Résultats de l'évaluation de la compréhension des histogrammes de l'étude n°1 (n=16). Réponses sous forme d'une échelle de Likert à "Je trouve la visualisation claire".

