

Visualisation physique et tangible de l'information

Yvonne Jansen - Résumé de Thèse de Doctorat en français

Titre Original: Physical and Tangible Information Visualisation

Soutenue le 10 mars 2014

1. Introduction

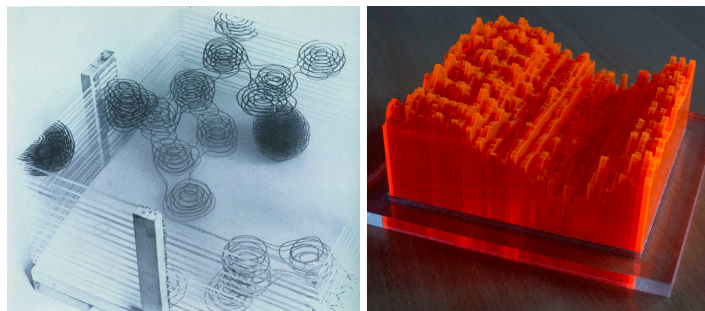


Figure 1: Deux exemples de visualisations physiques passives.

La représentation visuelle de l'information comme augmentation de l'intellect humain a une longue histoire. Les représentations externes permettent de raisonner sur l'information abstraite à l'aide de la vision pour détecter les tendances, les corrélations et les anomalies.

Cette conscience des bénéfices de la visualisation d'information était déjà prévalente tout au long du 19ème siècle et a donné lieu à une riche variété de représentations visuelles, en particulier dans le contexte des statistiques démographiques et de l'intelligence d'entreprise (voir par exemple Brinton, 1914). La création de graphiques était néanmoins à l'époque une activité laborieuse qui demandait des compétences et de la patience, car ils étaient créés à la main.

Avec l'apparition de l'informatique, la création automatique de graphiques, même pour des volumes de données importantes, est devenue possible. Peu de temps après, le domaine de la graphique statistique dynamique a émergé (Andrews et al., 1988). Depuis, la visualisation d'information (infovis) a été établie comme domaine (Card et al., 1999). Ce domaine regroupe un grand nombre de thèmes tels que l'efficacité de différents encodages visuels (Cleveland and

McGill, 1984), les techniques de visualisation pour différents types de données (par exemple temporelles, spatiales, et multidimensionnelles), les boîtes à outils de programmation (Fekete, 2004; Heer et al., 2005), les techniques d'interaction pour faciliter l'analyse exploratoire, ou encore les contributions théoriques tels que les modèles (Munzner, 2009; Card et al., 1999; Chi and Riedl, 1998) et les taxonomies (Amar et al., 2005; Morse et al., 2000).

La quasi-totalité de cette recherche présuppose un utilisateur travaillant dans un environnement de bureau avec un dispositif d'affichage bidimensionnel, une souris et un clavier. Plus récemment, des recherches se sont intéressées aux visualisations au-delà de l'environnement de bureau (Lee et al., 2012), mais les travaux dans ce domaine se concentrent toujours sur des visualisations sur écran, même s'il s'agit maintenant d'environnements à grandes surfaces d'affichage et de dispositifs tactiles.

Les dispositifs multipoints sont souvent considérés comme plus "physiques" et plus proches des interactions du monde réel que les configurations de bureau. Ces systèmes permettent aux utilisateurs de "toucher" les visualisations, et ils sont par conséquent considérés comme plus directs. Cependant, les actions physiques reconnues par les écrans tactiles ne prennent en compte qu'un petit nombre de gestes possibles. Le pouvoir d'expression de nos mains est beaucoup plus riche que ce que les écrans tactiles sont capables de prendre en compte (Victor, 2011).

Les techniques d'interaction tangibles exploitent cette expressivité via des dispositifs de contrôle physiques. Dans le domaine de l'interaction homme-machine, l'interaction tangible est aujourd'hui un sous-domaine bien établi. Néanmoins, l'idée d'interaction tangible n'a été appliquée en visualisation d'information que dans le cadre de solutions très spécifiques (par exemple Jetter et al., 2011; Klum et al., 2012; Spindler et al., 2010; Ullmer et al., 2003). Ces techniques permettent d'exploiter notre capacité à manipuler des objets du monde réel comme substituts d'objets virtuels (Ishii and Ullmer, 1997). La possibilité de donner une forme physique à l'information elle-même a cependant été largement ignorée, du moins depuis l'apparition de la visualisation assistée par ordinateur.

Si l'on regarde dans le passé, on réalise que les représentations physiques de l'information sont plus anciennes encore que l'invention de l'écriture (Schmandt-Besserat, 1996). Les découvertes archéologiques préhistoriques attestent que des objets physiques tels que les bâtons de comptage ont été utilisés pour la tenue des comptes et comme mémoire externe dès le paléolithique supérieur (il y a 12,000 à 30,000 ans) (Schmandt-Besserat, 1979). Ces objets se sont progressivement diversifiés en jetons de comptage plus expressifs et se sont finalement

transformés en représentations gravées ou dessinées sur des surfaces bidimensionnelles, d'abord sur des tablettes d'argile, puis sur du papier, et aujourd'hui sur des écrans d'ordinateur. Bien que les représentations bidimensionnelles sont versatiles et rapides à créer et à re-créeer, nous avons perdu une dimension spatiale et aujourd'hui les dispositifs d'affichage d'information sont principalement des surfaces plates qui sont inaccessibles à la manipulation directe. Le domaine de la visualisation d'information a largement oublié ses origines physiques.

Dans le domaine des interfaces utilisateur tangibles (TUIs), une tendance actuelle dans l'interaction homme-machine (IHM), des objets physiques tridimensionnels se mélangent aux systèmes informatiques et les objets physiques se marient avec l'information numérique. L'idée sous-jacente est de fournir des poignées physiques pour accéder à l'information et aux fonctionnalités informatiques. Alors que ce concept bourgeonne dans le domaine de l'IHM, il n'a été qu'occasionnellement appliqué aux systèmes de visualisation d'information (Lee et al., 2012). De manière générale, ce type de technologie peut lever les restrictions de l'informatique de bureau et mieux exploiter nos capacités à percevoir et à manipuler des objets physiques.

Cependant, les interfaces tangibles se contentent principalement de déplacer la partie entrée de l'interaction dans le monde physique, et continuent généralement à utiliser des dispositifs d'affichage 2D. Certes, la forme de ces dispositifs d'affichage varie énormément, consistant en une multitude d'écrans miniatures et un petit nombre d'écrans de grande taille comme l'avait prédit Mark Weiser en 1991 (Weiser, 1991). Certains dispositifs d'affichage sont même déformables (Schwesig et al., 2004), pliables (Khalilbeigi et al., 2012), ou enroulables (Khalilbeigi et al., 2011). Cependant, les changements de forme possibles restent très limités.

Dans les applications infovis, des variables visuelles telles que la position, la taille, la couleur ou la forme encodent les données (Bertin, 1967). Un contrôle détaillé et précis des propriétés physiques d'un dispositif d'affichage est par conséquent désirable. Les technologies actuelles d'affichage déformable (Rasmussen et al., 2012) n'ont pas encore exploré toutes les possibilités d'application pour la visualisation d'information, ou ne l'ont fait que pour des visualisations très spécifiques comme les histogrammes (Follmer et al., 2013). Les recherches actuelles sur la matière programmable (Wissner-Gross, 2008) et le concept d'atomes radicaux (Ishii et al., 2012) promettent de diversifier énormément le nombre de formes possibles, mais restent pour l'instant indisponibles pour le futur proche.

Parallèlement à l'évolution des systèmes informatiques, des artistes et des designers, mais aussi des analystes ont construit des visualisations physiques tridimensionnelles. Les formes de ces objets ne sont limitées que par les matériaux disponibles et les lois de la physique. Malgré ces

limitations, une riche variété de visualisations physiques a été créée et existe à ce jour (Dragicevic and Jansen, 2013), car ils semblent plus captivants (Gwilt et al., 2012), plus expressifs (Vande Moere, 2008) et, comme nous le montrons dans le chapitre 5 de cette thèse, parfois plus efficaces que les visualisations sur écran. Jusqu'ici, les visualisations physiques en tant que suppléments pragmatiques aux visualisations sur écran n'ont reçu que très peu d'attention dans le domaine de la visualisation d'information. Les gains que nous pouvons espérer en encodant l'information de manière physique restent incertains.

Je propose un changement dans la façon dont nous concevons les systèmes de visualisation d'information. La technologie se diversifie et fournit maintenant un large éventail d'environnements interactifs dont la visualisation d'information peut tirer parti. En particulier, les technologies qui permettent de donner une forme physique aux affichages d'information et à leurs dispositifs de contrôle constituent un terrain prometteur pour exploiter les capacités humaines à percevoir et manipuler des objets physiques. Les nouveaux environnements fournissent de nouvelles opportunités, et pour profiter aux mieux de ces opportunités nous avons besoin de nouveaux modèles et de données empiriques qui prennent en compte l'intégralité de l'environnement physique dans lequel les utilisateurs explorent l'information.

Les visualisations physiques et tangibles ont jusqu'ici reçu très peu d'attention dans le domaine de la visualisation d'information. Cette thèse fournit une première exploration systématique des bénéfices possibles et des limitations actuelles des visualisations physiques et tangibles, présente des modèles pour décrire, comparer et critiquer de tels systèmes, ainsi que des outils pour faciliter la création de tels systèmes. Cette thèse contribue ainsi à une meilleure compréhension de l'intérêt des représentations physiques émergentes pour la visualisation d'information.

Les pages suivantes fournissent un bref résumé des contributions de chaque chapitre de cette thèse.

2. Historique des visualisations physiques et tangibles

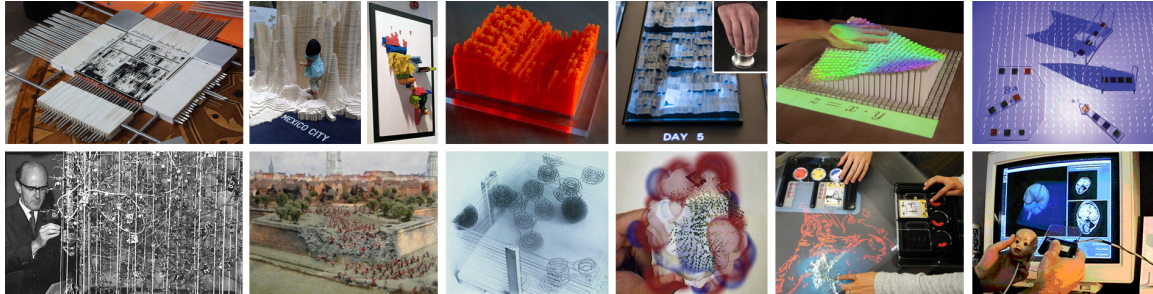


Figure 2: Différents exemples de visualisations physiques et tangibles créés à travers différentes périodes et dans différents domaines.

Dans ce chapitre, je fournis une vue d'ensemble des objets créés dans le passé pour les besoins de la visualisation d'information. Historiquement, différents domaines ont visualisé des données en utilisant des objets physiques. Initialement, c'était la seule méthode car la technologie informatique n'était pas disponible. Ensuite, ces objets sont devenus virtuels et les ordinateurs ont simplifié la tâche de création de visualisations, à l'époque laborieuse. Vers la fin du 20ème siècle les interfaces tangibles ont émergé, et ont partiellement réintégré les fonctionnalités informatique dans le monde physique.

Je discute des exemples provenant de différentes périodes, de la préhistoire à aujourd'hui. Depuis que les ordinateurs sont devenus largement accessibles, la motivation pour la création de visualisations physiques est devenue majoritairement artistique au lieu de pragmatique. Cependant, la disponibilité des technologies de fabrication numérique facilite aujourd'hui la création d'objets physiques et on observe un intérêt grandissant pour l'utilisation de visualisations physiques pour des objectifs pragmatiques.

3. Concepts et Terminologie

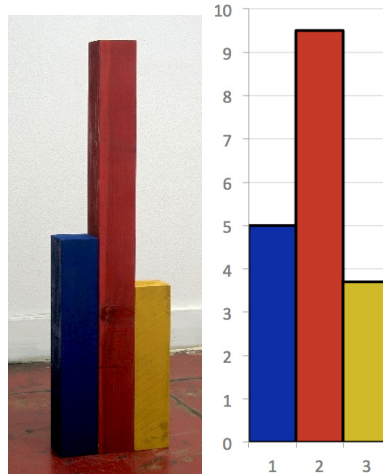


Figure 3: Une visualisation corporalisée (à gauche) et non corporalisée (à droite).

Dans ce chapitre, j'introduis un ensemble de termes et de concepts qui aident à classifier la grande variété de systèmes de visualisation existantes et hypothétiques. Les définitions proposées permettent une description cohérente des propriétés des objets de visualisation physique, et fournissent des méthodes pour examiner leurs propriétés perçues.

N'importe lequel de ces objets peut être d'abord décrit comme un *affichage d'information*, possédant un certain nombre de propriétés. Certains d'entre eux peuvent jouer le rôle de *contrôles* pour d'autres, et peuvent être modélisés comme des instruments (Beaudouin-Lafon, 2000). Finalement, j'introduis le concept de *corporalisation* afin de capturer comment un affichage d'information est perçu par un observateur. Une visualisation est corporalisée si les surfaces qui constituent ses marques visuelles sont confondues avec les surfaces physiques qui rendent ces marques visibles. Un contrôle est corporalisé si les surfaces qui communiquent ses affordances perçues et son état sont confondues avec les surfaces physiques qui le constituent.

4. Étude de cas: la physicalisation des contrôles pour l'interaction avec des murs d'écran



Figure 4: Télécommande tangible personnalisable pour interagir avec un nuage de points sur un mur d'écrans.

Dans ce chapitre, j'étudie les télécommandes tangibles personnalisables pour la visualisation dans les environnements à grandes surfaces d'affichage. Je présente les détails de la conception physique et la construction des contrôles physiques, et un prototype logiciel pour explorer la faisabilité de l'approche. Pour finir, je présente des résultats empiriques qui comparent la performance des contrôles physiques à des contrôles virtuels tactiles, et qui suggèrent qu'avec des contrôles tangibles, les utilisateurs peuvent plus facilement se focaliser sur le dispositif d'affichage visuel pendant qu'ils interagissent avec.

Cette première étude de cas sur les contrôles corporalisés et physicalisés constitue une exploration de la physicalisation de contrôles dans le but de les adapter à des environnements à grandes surface d'affichage. Ce travail montre les bénéfices possibles d'instruments dont les poignées physiques sont mieux adaptées à des opérateurs humains situés dans un environnement à grandes surfaces d'affichage. Les utilisateurs situés dans ces environnements peuvent se déplacer et interagir en maintenant leur attention sur les visualisations. L'hypothèse que les contrôles corporalisés peuvent faciliter la manipulation sans attention visuelle sur l'outil a été validée empiriquement.

5. Étude de cas: apports possibles de la physicalisation des visualisations

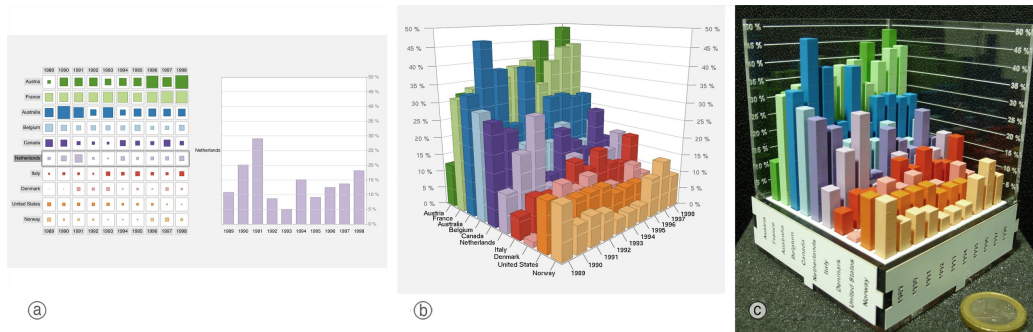


Figure 5: Trois modalités utilisées dans notre première expérience: une visualisation 2D entièrement interactive, une visualisation 3D sur écran et une visualisation 3D physique.

Dans ce chapitre, je m'intéresse à la physicalisation de la partie affichage d'un système de visualisation. Je présente la première étude de visualisation d'information qui compare des visualisations physiques avec des visualisations sur écran pour des tâches de lecture d'information. Les visualisations sont conçues de sorte à ce qu'elles diffèrent du point de vue de la modalité mais pas du point de vue de leur encodage visuel. Cette étude suggère que l'efficacité des visualisations physiques provient de caractéristiques uniques aux objets physiques, telles que leur capacité à être touchés et leur parfait réalisme visuel.

Cette étude montre les bénéfices qui peuvent découler de la physicalisation des visualisations. Alors que dans le chapitre précédent j'ai illustré les bénéfices qui peuvent découler des contrôles physiques, ici je montre que la corporalisation haptique de la visualisation elle-même permet à des observateurs d'employer leurs doigts comme aides cognitifs et navigationnels. Le réalisme visuel joue également un rôle.

Clairement, d'autres études sont nécessaires pour explorer plus en détail dans quelle mesure les contrôles et les visualisations corporalisées peuvent aider les observateurs à lire l'information, et pour généraliser nos résultats à d'autres encodages visuels. De plus, l'espace de conception des combinaisons d'objets physiques et virtuels pour la visualisation est largement inexploré. Comme base d'exploration, nous avons besoin d'une méthode cohérente pour décrire et comparer la grande variété des systèmes de visualisation possibles, et pour les mettre en correspondance avec des configurations de bureau plus conventionnelles.

6. Un modèle d'interaction pour les visualisations au-delà du bureau

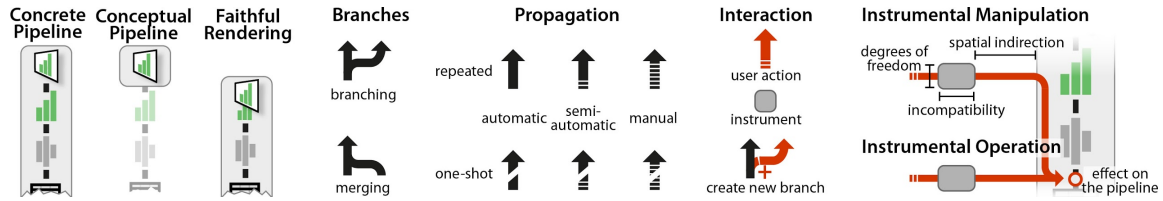


Figure 6: Éléments de notation visuelle pour les visualisations au-delà du bureau.

Afin de structurer l'exploration des systèmes de visualisations physiques et hybrides, je présente un modèle général pour capturer la grande variété des systèmes possibles. Ce modèle d'interaction pour les visualisations "au delà du bureau" permet de décrire et de comparer différents systèmes. Il comprend un système de notation visuelle qui permet de visualiser les équivalences et les différences entre plusieurs systèmes. Je démontre son utilité en visualisation les conditions expérimentales introduites auparavant, et en analysant 8 cas d'étude pris dans le domaine de la visualisation au-delà du bureau.

Ce modèle d'interaction et cette notation visuelle fournissent un mécanisme formel pour décrire, comparer et critiquer les systèmes de visualisation. Le modèle étend le modèle de visualisation de référence (le pipeline infovis), ainsi que le modèle d'interaction instrumental (Beaudouin-Lafon, 2000). Ce modèle est destiné à être très général: son objectif principal est de capture les systèmes de visualisation au-delà du bureau, c'est à dire les systèmes de visualisation qui combinent les contrôles et les visualisations avec différents degrés de physicalité, mais il peut aussi s'appliquer à des systèmes de bureau plus conventionnels.

Un modèle d'interaction devrait être idéalement descriptif, comparatif et génératif (Beaudouin-Lafon, 2000). Puisque le modèle présenté s'appuie sur le modèle d'interaction instrumentale, il conserve les propriétés de ce modèle. J'ai illustré le pouvoir descriptif de ce modèle via des cas d'étude, et son pouvoir comparatif en l'appliquant aux conditions expérimentales utilisées dans les études conduites dans cette thèse.

7. La création des visualisations physiques

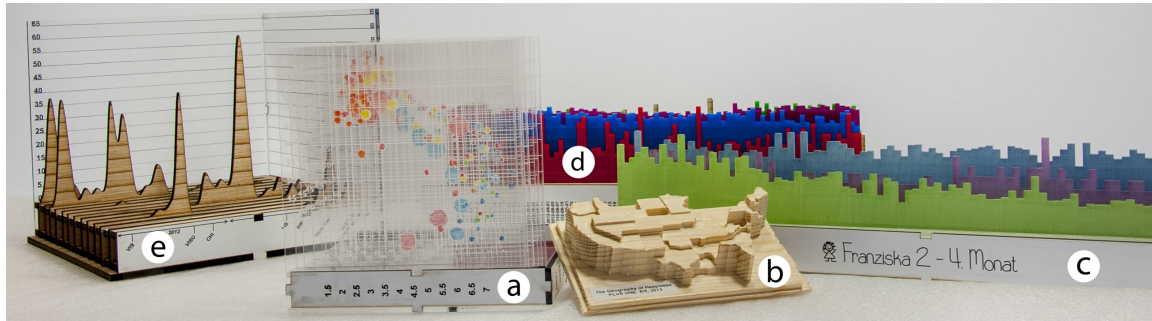


Figure 7: Exemples de visualisations physiques créées avec MakerVis.

Dans ce chapitre, je décris les pratiques courantes et les problèmes liés à la création de visualisations physiques. À partir de cette analyse, je présente un outil pour créer les visualisations physiques. Un tel outil diminue les coûts de développement pour la création de visualisations physiques. Par conséquent, un tel outil peut faciliter la collecte de données empiriques sur l'efficacité et l'utilité des visualisations physiques.

Comme le démontre le deuxième cas d'étude du chapitre précédent, les visualisations physiques passives ont une valeur inhérente en ce qu'elles peuvent faciliter la lecture de l'information dans certains cas (Chapitre 5) et elles peuvent même être considérées comme interactives (Chapitre 6). De plus, elles peuvent aussi servir de prototypes physiques pour les technologies dynamiques qui ne sont pas encore disponibles, tels que les affichages de forme et la matière programmable. Les recherches futures dans ce domaine vont probablement nous permettre de mieux comprendre la manipulation physique de l'information. Cependant, un facteur limitatif est la difficulté du processus de création des visualisations physiques.

J'introduis par conséquent MakerVis, un premier prototype d'outil qui permet d'ouvrir la création des visualisations physiques à une audience plus large de chercheurs et d'utilisateurs finaux, et qui ne nécessite pas de connaissances poussées en fabrication numérique. MakerVis peut être employé dans deux buts: i) continuer à évaluer les visualisations physiques (comme dans le Chapitre 5 mais en utilisant des techniques différentes) et ii) prototyper des interactions avec des technologies futures (Bonanni and Ishii, 2009; Parkes and Ishii, 2009). MakerVis peut être étendu pour s'adapter aux besoins spécifiques des chercheurs ou pour prendre en charge différentes techniques de fabrication. De nouveaux types de visualisation peuvent être ajoutés pour explorer plus en profondeur l'espace de conception des visualisations physiques. L'outil

facilite par conséquent la réplication de la recherche sur la conception de visualisations physiques efficaces, et est susceptible d'accélérer l'adoption générale des visualisations physiques utiles (Gaines, 1991).

8. Conclusion

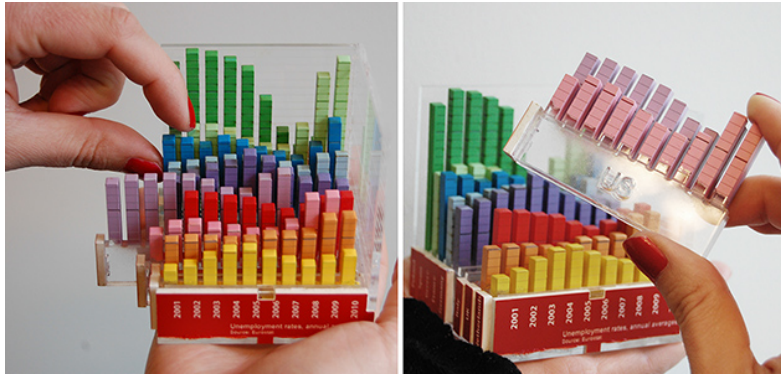


Figure 8: Une visualisation physique modulaire et réarrangeable, même passive, peut permettre d'accomplir une variété de tâches d'analyse visuelle.

Dans cette thèse, je propose un changement dans la façon dont nous concevons les systèmes de visualisation d'information. La technologie se diversifie et fournit maintenant un large éventail d'environnements interactifs dont la visualisation d'information peut tirer parti. En particulier, les technologies qui permettent de donner une forme physique aux affichages d'information et à leurs dispositifs de contrôle constituent un terrain prometteur pour exploiter les capacités humaines à percevoir et manipuler des objets physiques. Les nouveaux environnements fournissent de nouvelles opportunités, et pour profiter au mieux de ces opportunités nous avons besoin de nouveaux modèles et de données empiriques qui prennent en compte l'intégralité de l'environnement physique dans lequel les utilisateurs explorent l'information.

Les visualisations physiques et tangibles ont jusqu'ici reçu très peu d'attention dans le domaine de la visualisation d'information. Cette thèse fournit une première exploration formelle des bénéfices possibles et des limitations actuelles des visualisations physiques et tangibles, présente des modèles pour décrire, comparer et critiquer de tels systèmes, ainsi que des outils pour prendre en charge la création de tels systèmes. Cette thèse contribue par conséquent à la compréhension de la valeur des représentations physiques émergentes pour la visualisation d'information.

Grâce à la démocratisation des technologies de fabrication numériques (Gershenfeld, 2008; Tanenbaum et al., 2013), les utilisateurs peuvent maintenant créer de plus en plus d'objets physiques pour les besoins de visualisation ainsi que pour le contrôle de ces visualisations. À l'avenir, la technologie de fabrication numérique permettra de produire des objets qui pourront être instantanément utilisés comme périphériques d'entrée. D'autre part, la matière programmable permettra de concevoir des visualisations physiques interactives aussi riches en fonctionnalités que celles actuellement disponibles sur les ordinateurs de bureau. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour tirer pleinement avantage de cette technologie pour les besoins de la visualisation d'information, et pour rendre cette technologie accessible même à des utilisateurs non-experts.

Références

- R. Amar, J. Eagan, and J. Stasko. Low-level components of analytic activity in information visualization. In *InfoVis'05*, 2005.
- D. Andrews, E. Fowlkes, and P. Tukey. Some approaches to interactive statistical graphics. *Dynamic Graphics for Statistics*, pages 73–90, 1988.
- M. Beaudouin-Lafon. Instrumental interaction: an interaction model for designing post-wimp user interfaces. In *CHI '00: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 446–453, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- J. Bertin. *Sémiologie graphique*. Mouton; Paris: Gauthier-Villars, 1967.
- L. Bonanni and H. Ishii. Stop-motion prototyping for tangible interfaces. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pages 315–316. ACM, 2009.
- W. C. Brinton. *Graphic methods for presenting facts*. Brinton associates, 1914.
- S. Card, J. Mackinlay, and B. Shneiderman. *Readings in information visualization: using vision to think*, pages 1–34. Morgan Kaufmann, 1999.
- E. Chi and J. Riedl. An operator interaction framework for visualization systems. In *Information Visualization, 1998. Proceedings. IEEE Symposium on*, pages 63–70. IEEE, 1998.
- W. S. Cleveland and R. McGill. Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. *Journal of the American Statistical Association*, 79(387):531–554, 1984.

P. Dragicevic and Y. Jansen. List of physical visualizations. tinyurl.com/physvis, 2013. [Online; accessed 10-Nov-2013].

J.-D. Fekete. The InfoVis Toolkit. In Proc. of InfoVis'04, 2004.

S. Follmer, D. Leithinger, and A. O. A. H. H. Ishii. 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, pages 417–426. ACM, 2013.

B. R. Gaines. Modeling and forecasting the information sciences. *Information Sciences*, 57:3–22, 1991.

N. Gershenfeld. *Fab: the coming revolution on your desktop—from personal computers to personal fabrication*. Basic Books, 2008.

I. Gwilt, A. Yoxall, and K. Sano. Enhancing the understanding of statistical data through the creation of physical objects. In Proc. ICDC2012, pages 117–126, 2012.

J. Heer, S. K. Card, and J. A. Landay. Prefuse: a toolkit for interactive information visualization. In Proc. CHI'05, pages 421–430. ACM, 2005.

H. Ishii, D. Lakatos, L. Bonanni, and J.-B. Labrune. Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials. *interactions*, 19(1):38–51, January 2012.

H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proc. CHI'97, pages 234–241. ACM, 1997.

Y. Jansen. *Physical and Tangible Information Visualization*. PhD thesis. Université Paris-Sud, 2014.

H. Jetter, J. Gerken, M. Zöllner, H. Reiterer, and N. Milic-Frayling. Materializing the query with facet-streams: A hybrid surface for collaborative search on tabletops. In Proc. of CHI'11, pages 3013–3022. ACM, 2011.

M. Khalilbeigi, R. Lissermann, M. Mühlhäuser, and J. Steimle. Xpaaand: interaction techniques for rollable displays. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 2729–2732. ACM, 2011.

M. Khalilbeigi, R. Lissermann, W. Kleine, and J. Steimle. Foldme: Interacting with double-sided foldable displays. In TEI '12: Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, pages 33–40, New York, NY, USA, 2012. ACM.

- S. Klum, P. Isenberg, R. Langner, J.-D. Fekete, and R. Dachsel. Stackables: combining tangibles for faceted browsing. In AVI '12: Proc. of AVI'12, pages 241–248, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- B. Lee, P. Isenberg, N. Riche, S. Carpendale, et al. Beyond mouse and keyboard: Expanding design considerations for information visualization interactions. *IEEE TVCG*, 18(12), 2012.
- E. Morse, M. Lewis, and K. Olsen. Evaluating visualizations: using a taxonomic guide. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(5):637–662, 2000.
- T. Munzner. A nested model for visualization design and validation. *Visualization and Computer Graphics*, *IEEE Transactions on*, 15(6):921–928, 2009.
- A. Parkes and H. Ishii. Kinetic sketchup: motion prototyping in the tangible design process. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pages 367–372. ACM, 2009.
- M. K. Rasmussen, E. W. Pedersen, M. G. Petersen, and K. Hornbæk. Shape-changing interfaces: a review of the design space and open research questions. In *CHI'12*, 2012.
- D. Schmandt-Besserat. *How writing came about*. University of Texas Press, 1996.
- D. Schmandt-Besserat. Reckoning before writing. *Archaeology New York, NY*, 32(3): 22–31, 1979.
- C. Schwesig, I. Poupyrev, and E. Mori. Gummi: a bendable computer. In *Proc. of CHI'04*, pages 263–270. ACM, 2004.
- M. Spindler, C. Tominski, H. Schumann, and R. Dachsel. Tangible views for information visualization. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pages 157–166. ACM, 2010.
- J. G. Tanenbaum, A. M. Williams, A. Desjardins, and K. Tanenbaum. Democratizing technology: pleasure, utility and expressiveness in DIY and maker practice. In *Proc. CHI 2013*, pages 2603–2612. ACM, 2013.
- B. Ullmer, H. Ishii, and R. J. Jacob. Tangible query interfaces: Physically constrained tokens for manipulating database queries. *Proc. of INTERACT*, volume 2003, pages 279–286, 2003.
- A. Vande Moere. Beyond the tyranny of the pixel: Exploring the physicality of information visualization. In *IV'08*, 2008.

B. Victor. A brief rant on the future of interaction design. <http://tinyurl.com/picsunderglass>, 2011.

M. Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, 265(3):94–104, 1991.

A. D. Wissner-Gross. Physically Programmable Surfaces. PhD thesis, Harvard University, 2008.

.