

1024

B U L L E T I N
de la société informatique
de France

avril

2020

COMITÉ DE RÉDACTION

OLIVIER BAUDON

Université de Bordeaux

YOANN BERTRAND

*Consultant en informatique,
Villeneuve-Loubet*

JEAN-PAUL DELAHAYE

Université de Lille

THOMAS FERNIQUE

CNRS, Université Paris 13

PHILIPPE MARQUET

Université de Lille

ARNAUD MARTIN

Université de Rennes

EUNIKA MERCIER-LAURENT

Université de Lyon

PIERRE PARADINAS

CNAM Paris

NATHALIE REVOL

Inria, Université de Lyon

MICHEL RAYNAL

Université de Rennes

VINCENT RIBAUD

Université de Bretagne Occidentale

NANCY RODRIGUEZ

Université de Montpellier

FLORENCE SÈDES

Université de Toulouse

BENJAMIN THIERRY

Sorbonne Université

BRIGITTE VALLÉE

CNRS, Université de Caen

ÉRIC SOPENA, *Université de Bordeaux, rédacteur en chef adjoint*

DENIS PALLEZ, *Université Côte d'Azur, rédacteur en chef*

Contact : 1024@societe-informatique-de-france.fr



*Cette œuvre est mise à disposition sous licence Attribution - Pas de Modification 4.0 France.
Pour voir une copie de cette licence, visitez*

<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.fr>

*ou écrivez à Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California,
94041, USA.*

SOCIÉTÉ INFORMATIQUE DE FRANCE

Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05

Prix public : 32 € (adhérents SIF : -30%)

Directeur de la publication : Pierre Paradinas

ISSN : 2270-1419

Couverture : d'après une maquette réalisée par Lollygraph.com.

SOMMAIRE DU N° 15



SIF

Le mot de la SIF, <i>Pierre Paradinas</i>	3
---	---

ARTICLES SCIENTIFIQUES

L'algorithme de tri <i>ShiversSort</i> adaptatif, <i>Vincent Jugé</i>	5
Techniques d'anonymisation tabulaire : concepts et mise en œuvre, <i>Benjamin Nguyen et Claude Castelluccia</i>	23

DOSSIER : ACCESSIBILITÉ ET INFORMATIQUE

Introduction à l'accessibilité, <i>T. Fraysse</i>	43
L'informatique, pour un monde plus accessible, <i>Philippe Truillet</i>	45
Le projet <i>GazePlay</i> : des jeux ouverts, gratuits et une communauté pour les personnes en situation de polyhandicap, <i>Schwab, Riou, Fejza, Vial, Marku, El Hussein, Sannara Ek, Bardon, Robert</i>	59
De la réingénierie d'un <i>serious escape game</i> sur la société inclusive aux recherches en informatique, <i>Muratet, Arneton, Ferrand, Geffroy, Vanbrugghe, Garbarini</i>	73
Simulateur pour l'apprentissage de la conduite en fauteuil roulant électrique pour des enfants polyhandicapés, <i>Nancy Rodriguez</i>	83

DU CÔTÉ DES ASSOCIATIONS

ARIA	97
ATIEF	98
EGC	100
MMI	102
ROADEF	104

ENSEIGNEMENT

La Nuit de l'info, le plus <i>fun serious-game</i> regroupant des milliers d'étudiants, <i>Le bureau de la Nuit de l'info</i>	107
---	-----

FEMMES ET INFORMATIQUE

Agissons ! Les femmes scientifiques et ingénierues font des propositions pour plus de mixité dans les métiers d'ingénierues et de scientifiques, <i>Florence Sèdes</i>	109
--	-----

HOMMAGE

Hommage à Jacques Pitrat, <i>Jean-Gabriel Ganascia</i>	113
--	-----

INFORMATIQUE ET SOCIÉTÉ

GENCI : Grand équipement national de calcul intensif, <i>Jean-Philippe Proux, Delphine Théodorou, Pascal Voury</i>	117
Intelligence artificielle 4.0 pour l'Industrie 4.0, <i>Eunika Mercier-Laurent</i>	127

MA THÈSE EN 1024 CARACTÈRES

Rappel des conditions de soumission, <i>Le comité de rédaction</i>	139
Algorithmes de bandits multi-joueurs pour les réseaux de l'Internet des objets, <i>Lilian Besson</i>	140
Détection et classification fines d'actions à partir de vidéos par réseaux de neurones à convolutions spatio-temporelles, application au tennis de table, <i>Pierre-Étienne Martin</i>	140
Schémas d'induction : de la séparation de langages à la coloration de graphes, <i>Théo Pierron</i> ..	141
Évaluation de l'effectivité des systèmes ambiants, <i>Gérald Rocher</i>	142

MEMBRES D'HONNEUR 2020

Claude Girault	143
Aurélie Jean	147

PRIX ET DISTINCTIONS

Bilan du prix de thèse Gilles Kahn 2019, <i>Clémentine Maurice et Charlotte Truchet</i>	151
Prix de thèse Gilles Kahn 2020, <i>Clémentine Maurice et Charlotte Truchet</i>	153

RÉCRÉATION

La file de chapeaux, <i>Jean-Paul Delahaye</i>	157
--	-----



Le mot de la SIF

Pierre Paradinas¹

Chères adhérentes, chers adhérents,

Quel plaisir, partagé j'espère, que de régulièrement découvrir le nouveau numéro de 1024. Comme à l'accoutumée, vous retrouverez les rubriques qui construisent notre communauté, avec la présentation des associations membres du Conseil des associations qui travaillent ensemble avec la SIF; les actions nombreuses menées pour développer la présence des femmes; les rubriques hommage et membres d'honneur; ma thèse en 1024 caractères et le prix de thèse qui assurent la relève de notre communauté.

Vous y retrouverez aussi un ensemble d'articles sur l'accessibilité, car il est important que nous soyons très vigilants à l'accès de tous au numérique, sans exclusion des personnes n'ayant pas les mêmes moyens de médiation avec les outils informatiques.

La SIF est aussi très sensible aux enjeux sociétaux; nous accueillons, dans ce numéro, un peu de science avec un article sur des techniques particulières d'anonymisation et un autre sur l'amélioration de l'algorithme de tri utilisé par défaut dans les langages Java et Python.

Ce numéro a été tiré à un nombre exceptionnellement supérieur aux tirages habituels car il sera distribué aux professeures et professeurs qui suivent le DIU-EIL² (diplôme inter-universitaire « Enseigner l'informatique au lycée ») en vue d'enseigner la spécialité Numérique et sciences informatiques (NSI). C'est avec plaisir que

1. Président de la Société informatique de France, professeur titulaire de la chaire Systèmes embarqués au CNAM à Paris, pierre.paradinas@cnam.fr, twitter : @DAATLE.

2. <https://sourcesup.renater.fr/www/diu-eil/>



la SIF vous offre ce numéro et tient à souligner l'engagement des très nombreux enseignantes et enseignants qui ont permis le déploiement de NSI dans de nombreux établissements.

Chères amies et chers amis de la SIF, avec le rédacteur en chef de 1024 et son comité éditorial, nous vous invitons à proposer des articles pour notre bulletin. Pour cela, n'hésitez pas à nous contacter à l'adresse suivante :

1024@societe-informatique-de-france.fr.



L'algorithme de tri *ShiversSort* adaptatif

Vincent Jugé¹

Nous présentons ci-dessous l'algorithme de tri ShiversSort adaptatif. Cet algorithme est une variante du célèbre algorithme TimSort, qui est l'algorithme utilisé dans les bibliothèques standard de langages de programmation tels que Python et Java (pour les types non primitifs). Plus précisément, il appartient à la classe des algorithmes dits k-aware, classe introduite par Buss et Knop et censée caractériser les algorithmes semblables à TimSort.

Nous démontrons ici que ShiversSort adaptatif requiert un nombre de comparaisons presque optimal parmi l'ensemble des algorithmes de tri par fusion dits naturels : le surcoût de ShiversSort adaptatif est au plus linéaire en la taille du tableau à trier. ShiversSort adaptatif est le premier algorithme k-aware à jouir d'une telle propriété, qui permet entre autres une amélioration de 33 % de la complexité de TimSort dans le pire des cas. Tout ceci suggère que ShiversSort adaptatif pourrait être un substitut naturel à l'utilisation de TimSort.

Introduction

Le problème du tri des données est l'un des problèmes les plus anciens et les plus étudiés dans le domaine de l'informatique. En effet, l'usage d'algorithmes de tri est

1. Maître de conférences à l'Université Gustave Eiffel, LIGM (UMR 8049), CNRS, ENPC, ESIEE Paris, UPEM, F77454, Marne-la-Vallée, France.

omniprésent, puisqu'il est souvent nécessaire en tant que brique de base de nombreux autres algorithmes. Par conséquent, dès les années 1940, de multiples algorithmes de tri ont été élaborés, chacun jouissant de diverses propriétés d'optimalité, concernant aussi bien leur complexité temporelle (et, plus précisément, en nombre de comparaisons et de déplacements d'éléments requis) que spatiale. Ainsi, chaque décennie vient avec ses nouveaux algorithmes de tri, chacun utilisant une approche différente ou consistant en l'adaptation de structures de données dédiées, et ce dans le but d'améliorer les algorithmes préexistants : on peut ainsi citer le tri fusion [8], le tri rapide [10], le tri par tas [20], ou encore les algorithmes SmoothSort [6] et SplaySort [14].

L'un de ces algorithmes est TimSort, inventé en 2002 par Tim Peters [16]. Cet algorithme a très vite été remarqué pour sa capacité à trier efficacement des données réelles, et est bientôt devenu un algorithme de tri des bibliothèques standard de langages de programmation tels que Python et Java. L'irruption d'un tel algorithme conçu de manière peu ou prou artisanale, et qui affichait cependant de meilleures performances que bien d'autres algorithmes pourtant considérés comme optimaux, a donc ravivé l'intérêt pour l'étude des algorithmes de tri.

Comprendre précisément les raisons du succès de TimSort est une tâche de longue haleine. Ces raisons sont, entre autres, le fait que TimSort soit particulièrement adapté à l'architecture des ordinateurs (par exemple dans la gestion du cache) et à des modèles de distribution de données réalistes. Un tel modèle, qui met en évidence à quel point TimSort est adapté dès qu'il s'agit de traiter des données pré-triées, se base sur la notion de *sous-suites monotones* [3, 7] (ci-après appelées runs), c'est-à-dire de sous-suites croissantes ou bien strictement décroissantes, comme illustré en Figure 1.

$$S = (\underbrace{12, 7, 6, 5, 4, 3, 1, 0}_{1^{\text{er}} \text{ run}}, \underbrace{0, 7, 14, 36, 37, 42, 73}_{2^{\text{e}} \text{ run}}, \underbrace{3, 3, 5, 21, 21, 21, 24}_{3^{\text{e}} \text{ run}})$$

FIGURE 1. Une suite d'entiers et sa décomposition en runs : les deux premiers éléments de chaque run déterminent s'il s'agit d'un run croissant ou bien strictement décroissant.

La décomposition d'un tableau en de telles sous-suites était déjà à la base du NaturalMergeSort de Knuth [12], inventé avant TimSort, et qui consiste en la variante suivante du tri fusion classique. NaturalMergeSort procède en deux phases : dans un premier temps, et à l'aide d'un algorithme glouton, on identifie les sous-suites monotones maximales dont est formé le tableau ; puis on fusionne ces sous-suites deux à deux, à la manière du tri fusion usuel. En écho à l'apparition de cet algorithme, tout algorithme basé sur la décomposition d'un tableau en de telles sous-suites monotones est qualifié de tri fusion *naturel*.

Outre le fait qu'il s'agisse d'un tri fusion naturel, TimSort inclut également de nombreuses optimisations, soigneusement conçues et paramétrées en s'appuyant sur des jeux de tests exhaustifs. Cette méthode de conception a donné à TimSort sa structure générale, que l'on peut sommairement découper en trois parties peu ou prou indépendantes : (i) un tri par insertion un peu compliqué, utilisé pour traiter de petits *runs* (de longueur 32 ou moins); (ii) une stratégie simple pour décider quels grands *runs* (de longueur 33 ou plus) fusionner; (iii) l'usage d'une procédure assez complexe pour fusionner ces *runs*. Les première et troisième composantes sont celles qui sont les plus compliquées, et dont les paramètres ont été choisis suite à des tests empiriques. Comprendre précisément pourquoi elles sont efficaces et comment les améliorer semble donc difficile. En revanche, la deuxième composante est assez simple. C'est donc là que repose une grande partie du potentiel de modification et d'amélioration de TimSort.

Éléments de contexte.

Peu après son invention, l'algorithme TimSort a été largement adopté comme standard dans de multiples langages de programmation. La communauté scientifique a donc cherché à répliquer ce succès, en élaborant des algorithmes eux aussi très performants sur des données déjà partiellement ordonnées. Cependant, et en raison de sa conception artisanale et hors du milieu académique, TimSort s'est avéré moins facile à analyser que prévu.

Ainsi, on pourrait espérer que TimSort, comme tout algorithme de tri décent, ne nécessite que $\mathcal{O}(n \log(n))$ comparaisons pour trier des tableaux de taille n . De manière surprenante, ce résultat n'a été démontré qu'en 2015, plus d'une décennie après que TimSort avait déjà été largement déployé. Pire encore, et à cause de l'absence d'une analyse théorique et systématique de cet algorithme, certains bugs des implémentations de TimSort dans les langages Java et Python n'ont été découverts que très récemment [1, 5].

Parallèlement, et depuis l'invention de TimSort, plusieurs algorithmes de tri fusion naturels ont été élaborés, chacun étant censé jouir de bornes de complexité faciles à démontrer : ShiversSort [18], MinimalSort [3, 19], α -MergeSort [4], PowerSort [15], etc. Ces algorithmes ont souvent de nombreuses propriétés communes avec TimSort. Quelques-unes d'entre elles sont mentionnées dans la Table 1.

Par exemple, et hormis MinimalSort, tous ces algorithmes sont *stables*. Cela signifie que ces algorithmes préservent l'ordonnancement initial des éléments que l'ordre considère comme égaux. Il s'agit d'une propriété très importante des tris fusion. En effet, elle signifie que seuls des *runs* adjacents seront fusionnés, ce qui permet d'effectuer ces fusions directement sur le tableau à trier plutôt qu'en utilisant des listes chaînées. Cette propriété est également cruciale dès lors qu'il s'agit de trier des tableaux dont les éléments sont de types composites (en Java, il s'agira de tous les types non primitifs), qui pourraient être triés de deux manières différentes en fonction de diverses mesures de comparaison.

Algorithme	Complexité	Stable	<i>k-aware</i>	Coût des fusions
NaturalMergeSort	$\Theta(n + n \log(\rho))$	✓	✗	$n \log_2(\rho) + \mathcal{O}(n)$
TimSort	$\Theta(n + n \mathcal{H})$	✓	$k = 4$	$3/2 n \mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$
ShiversSort	$\Theta(n \log(n))$	✓	$k = 2$	$n \log_2(n) + \mathcal{O}(n)$
MinimalSort	$\Theta(n + n \mathcal{H})$	✗	✗	$n \mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$
α -MergeSort	$\Theta(n + n \mathcal{H})$	✓	$k = 3$	$c_\alpha n \mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$
PowerSort	$\Theta(n + n \mathcal{H})$	✓	✗	$n \mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$

TABLE 1. Propriétés de plusieurs tris fusion naturels – La constante c_α est comprise entre 1.04 et 1.09 – Le *coût des fusions* d'un algorithme est approximativement égal au nombre de comparaisons et de déplacements d'éléments que l'algorithme requiert dans le pire des cas, et donc à sa complexité en temps.

En outre, chacun de ces algorithmes trie les tableaux de taille n en temps $\mathcal{O}(n \log(n))$. En général, et dans le modèle de tri par comparaisons (où un algorithme n'a droit qu'à deux opérations de base, qui sont *comparer deux éléments* et *copier un élément à un autre endroit de la mémoire*), on ne peut pas faire mieux. Cependant, en choisissant des paramètres qui nous permettront de mieux décrire le caractère partiellement ordonné d'un tableau, on peut espérer affiner cette borne supérieure sur le temps d'exécution de l'algorithme.

Ainsi, si l'on note ρ le nombre de runs dont est formé le tableau à trier, il s'avère que tous ces algorithmes, à l'exception de ShiversSort, fonctionnent en fait en temps $\mathcal{O}(n + n \log(\rho))$. Notons ici que l'on a bien sûr $\rho \leq n$, et qu'il existe des tableaux de taille n tels que $\rho \geq n/2$. Cette nouvelle borne supérieure n'est donc pas toujours meilleure que la borne précédente, mais elle l'est *dans certains cas*, qui sont justement les cas qui nous intéressent, c'est-à-dire les cas des tableaux partiellement ordonnés.

On peut même aller plus loin dans cette démarche et choisir comme paramètres, outre la longueur du tableau et le nombre de *runs* dont il est formé, la longueur de ces *runs*, que l'on notera r_1, \dots, r_ρ . On peut alors démontrer que certains des algorithmes mentionnés ci-dessus fonctionnent en temps $\mathcal{O}(n + n \mathcal{H})$, où l'on a posé $\mathcal{H} = \sum_{i=1}^\rho (r_i/n) \log_2(n/r_i)$: remarquons ici que, si l'on note R le *run* auquel appartient un élément choisi uniformément au hasard parmi les n éléments du tableau, la quantité \mathcal{H} n'est autre que l'*entropie* de la variable aléatoire R . On dira donc qu'il s'agit de l'*entropie* du tableau. De plus, on peut une fois encore démontrer que, dans ce nouveau cadre de travail, la borne supérieure en $\mathcal{O}(n + n \mathcal{H})$ que nous avons obtenue est en fait optimale [3, 13].

Au vu de la Table 1, quatre algorithmes ont des complexités de l'ordre de $\mathcal{O}(n +$

$n\mathcal{H}$). Afin de les distinguer, il nous faut donc mettre au point des mesures de complexité plus fines. De surcroît, et à l'exception notable de TimSort, il s'avère que tous ces algorithmes ne sont en fait caractérisés que par la stratégie utilisée pour décider quels *runs* fusionner. La sous-routine choisie pour fusionner effectivement deux *runs* y est donc implicite, et son implémentation laissée au libre choix du programmeur. Cette situation nous pousse donc à travailler dans le modèle de coût suivant.

Pour fusionner deux *runs* adjacents de longueurs m et n , un algorithme de fusion naïf requiert de l'ordre de $m + n$ comparaisons et déplacements d'éléments. Or, quel que soit l'algorithme de fusion utilisé, et dans le pire des cas, on aura toujours besoin de $m + n$ déplacements d'éléments. Par conséquent, dans tout l'article, nous mesurerons la complexité des algorithmes en terme de *coût des fusions* [2, 4, 9, 15] : le coût d'une fusion entre deux *runs* de longueurs m et n est défini comme l'entier $m + n$, et on identifie la complexité d'un algorithme à la somme des coûts des différentes fusions que l'algorithme aura exécutées pour trier un tableau.

On peut alors démontrer que le coût des fusions de n'importe quel algorithme de tri fusion naturel est d'au moins $n\mathcal{H}$, même dans le meilleur des cas. Cette remarque nous amène à identifier MinimalSort et PowerSort comme les deux seuls algorithmes dont le coût des fusions est optimal. Et, puisque PowerSort est stable, cet algorithme est donc un candidat naturel pour succéder à TimSort en tant qu'algorithme de tri standard dans les langages Python et Java. Néanmoins, et même s'il admet des implémentations similaires à celles de TimSort, la stratégie qu'il utilise pour décider quels *runs* fusionner est nettement plus complexe.

La question de l'existence d'un algorithme de tri fusion naturel simple dont la structure semblable à celle de TimSort et dont le coût des fusions serait optimal (à un terme additif linéaire en n près) reste donc ouverte.

Une première étape, sur le chemin de cet objectif, consiste à définir une notion adéquate permettant de caractériser ce qui fait qu'un algorithme est simple et semblable à TimSort. La stratégie de TimSort consiste à découvrir les *runs* à la volée, à la manière d'un algorithme glouton, et à les stocker dans une pile : si un *run* couvre les éléments en positions $i, i + 1, \dots, j$ dans le tableau, la pile contiendra la paire (i, j) . Puis TimSort ne procède qu'à des fusions entre *runs* stockés dans le dessus de la pile, et les décisions qu'il prend ne sont basées que sur les longueurs de ces *runs* situés au-dessus de la pile. Procéder ainsi s'avère très avantageux au vu de l'architecture des ordinateurs actuels, par exemple parce que cela nous permet de tirer largement parti de l'existence de mémoire cache dans les processeurs.

C'est sur la base de ce constat qu'a été inventée la notion d'algorithme *k-aware* [4]. Un tri fusion naturel est *k-aware* si les *runs* qu'il fusionne figurent tous parmi les k premiers *runs* de la pile, et si les décisions qu'il prend ne sont basées que sur les longueurs de ces k premiers *runs*. La 4^e colonne de la Table 1 indique quels algorithmes sont *k-aware* pour un paramètre k fini, auquel cas elle indique également la plus petite valeur de k possible.

Se concentrer sur la recherche d’algorithmes *k-aware* nous permet donc de nous concentrer sur la partie (ii) de TimSort, sans modifier les composantes (i) et (iii) qui, si elles ont elles aussi été mises au point en dehors d’un cadre académique, ont néanmoins été l’objet de moult optimisations. Par conséquent, si l’on amende de manière marginale la stratégie de fusion de TimSort, on peut raisonnablement espérer que toutes les optimisations effectuées sur les composantes (i) et (iii) de TimSort resteront valides, et ce même si elles ne sont pas comprises dans le détail. C’est pourquoi, dans la suite, nous identifierons chaque algorithme de tri fusion naturel avec sa stratégie de fusion des *runs*, quitte à intégrer les composantes (i) et (iii) de TimSort ultérieurement.

Contributions.

Nous présentons un nouvel algorithme de tri fusion, appelé ShiversSort adaptatif. Comme mentionné précédemment, cet algorithme sera assimilé à la stratégie qu’il suit pour savoir quels *runs* fusionner. ShiversSort adaptatif se situe à mi-chemin entre les algorithmes TimSort et ShiversSort, avec pour objectif de bénéficier des forces de chacun de ces deux algorithmes. Il en résulte un algorithme dont la stratégie est extrêmement similaire à celle de TimSort, au point que passer de l’un à l’autre ne nécessiterait de modifier qu’une dizaine de lignes (sur un millier) du code de TimSort en Java.

ShiversSort adaptatif est un algorithme *3-aware* et stable, dont le coût des fusions est égal à $n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$. ShiversSort adaptatif apparaît donc comme optimal vis-à-vis de tous les critères mentionnés dans la Table 1. En particulier, il s’agit du premier algorithme *k-aware* doté d’un coût des fusions en $n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$, ce qui nous permet de répondre positivement à une conjecture de Buss et Knop [4]. De plus, sa stratégie simple nous permet d’obtenir une preuve de complexité simple elle aussi ; nous en proposons, ci-dessous, une version courte mais complète.

ShiversSort adaptatif et algorithmes apparentés

Nous décrivons, dans cette section, la stratégie qu’utilisent ShiversSort adaptatif et plusieurs autres algorithmes de tri fusion naturels pour décider quels *runs* fusionner. La stratégie de ShiversSort adaptatif est présentée dans l’algorithme 1.

Comme TimSort, cet algorithme consiste à découvrir des *runs*, c’est-à-dire des sous-suites monotones, et à les maintenir dans une pile. Au cours de l’algorithme, et selon que l’on tombe dans un des cas n° 1 à 4, on pourra soit fusionner deux des *runs* situés en haut de la pile, soit insérer un nouveau *run* dans la pile. En particulier, puisque les conditions régissant les cas n° 1 à 4 ne dépendent que des valeurs des entiers ℓ_1 , ℓ_2 et ℓ_3 , et puisque seuls les *runs* R_1 , R_2 et R_3 peuvent être fusionnés, l’algorithme ShiversSort adaptatif appartient à la famille des algorithmes *3-aware* définie par Buss et Knop [4].

Algorithm 1: ShiversSort adaptatif

Entrée : Tableau T à trier

Résultat : Le tableau T est trié. Il consiste en un unique *run*, qui reste stocké dans la pile \mathcal{P} .

Remarque: On note h la hauteur de la pile \mathcal{P} , et R_i son i -ième plus haut élément (avec $1 \leq i \leq h$). On note r_i la longueur du *run* R_i , et on pose $\ell_i = \lfloor \log_2(r_i) \rfloor$. Dans la pile \mathcal{P} , chaque *run* est représenté par deux pointeurs vers ses premier et dernier éléments. Quand on fusionne deux *runs* consécutifs, on les remplace, dans \mathcal{P} , par le *run* résultant de la fusion.

```

runs ← décomposition de  $T$  en runs
 $\mathcal{P} \leftarrow$  pile vide
tant que vrai :
  si  $h \geq 3$  et  $\ell_1 \geq \ell_3$  : fusionner les runs  $R_2$  et  $R_3$            ▷ cas n° 1
  sinon, si  $h \geq 3$  et  $\ell_2 \geq \ell_3$  : fusionner les runs  $R_2$  et  $R_3$            ▷ cas n° 2
  sinon, si  $h \geq 2$  et  $\ell_1 \geq \ell_2$  : fusionner les runs  $R_1$  et  $R_2$            ▷ cas n° 3
  sinon, si  $\text{runs} \neq \emptyset$  : ôter un run  $R$  de runs et
    l'insérer dans la pile  $\mathcal{P}$                                          ▷ cas n° 4
  sinon : sortir de la boucle principale
tant que  $h \geq 2$  :
  fusionner les runs  $R_1$  et  $R_2$ 

```

Le lecteur aura pu noter que les cas n° 1 et n° 2 ont tous deux pour conséquence la fusion entre les *runs* R_2 et R_3 . Nous avons décidé de séparer ces deux cas afin de simplifier l'analyse de complexité effectuée c.

Présentons maintenant quelques-uns des algorithmes k -*aware* mentionnés dans la Table 1. Bien qu'apparentés à ShiversSort adaptatif, ils utilisent une stratégie différente, que l'on peut en fait obtenir en ne modifiant que la boucle principale de ShiversSort adaptatif.

Voici tout d'abord l'algorithme TimSort, conçu par Tim Peters [16], et dont la boucle principale est présentée ci-dessous :

Comme mentionné dans l'introduction, le coût des fusions de TimSort est en $\mathcal{O}(n + n\mathcal{H})$. Ce résultat repose sur les deux ingrédients suivants : (i) on s'abstient de fusionner un *run* nouvellement arrivé au sommet de la pile tant qu'il n'est pas de taille comparable avec celle des autres *runs* situés en haut de la pile, et (ii) on maintient un invariant (l'inégalité $r_i + r_{i+1} \leq r_{i+2}$ pour tout $i \geq 3$) grâce auquel les tailles des *runs*, quand on s'enfonce dans les profondeurs de la pile, croissent à vitesse exponentielle.

tant que vrai :		▷ boucle principale
si $h \geq 3$ et $r_1 > r_3$: fusionner les <i>runs</i> R_2 et R_3	▷ cas \diamond
sinon, si $h \geq 2$ et $r_1 \geq r_2$: fusionner les <i>runs</i> R_1 et R_2	▷ cas \spadesuit
sinon, si $h \geq 3$ et $r_1 + r_2 \geq r_3$: fusionner les <i>runs</i> R_1 et R_2	▷ cas \clubsuit
sinon, si $h \geq 4$ et $r_2 + r_3 \geq r_4$: fusionner les <i>runs</i> R_1 et R_2	▷ cas \heartsuit
sinon, si $\text{runs} \neq \emptyset$: ôter un <i>run</i> R de <i>runs</i> et l'insérer dans la pile \mathcal{P}	▷ cas n° 4
sinon	: sortir de la boucle principale	

Notons au passage que le cas \heartsuit avait été omis dans la version originale de TimSort, et que cette omission était passée inaperçue en raison de l'absence d'analyse de complexité de l'algorithme. Cependant, et en l'absence du cas \heartsuit , l'invariant que TimSort était censé maintenir n'était en fait plus nécessairement vérifié, et la complexité en mémoire de l'algorithme était supérieure à ce qui avait été prévu. Il en a résulté l'apparition de multiples bugs, liés à des dépassements de mémoire, dans les implémentations de TimSort en Python et en Java [1, 5].

Par ailleurs, une analyse fine de la complexité de TimSort, dans sa version actuelle, permet de démontrer que la constante multiplicative cachée dans la notation \mathcal{O} est assez élevée, puisqu'elle est de 50% supérieure à la constante optimale. C'est l'objet du résultat ci-dessous, démontré dans [1, 4].

Théorème 1. *Le coût des fusions de TimSort, sur des tableaux de longueur n et d'entropie \mathcal{H} , est inférieur ou égal à $3/2n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$. En outre, il existe des tableaux de longueur n pour lesquels le coût des fusions de TimSort est de l'ordre de $3/2n\log_2(n) + \mathcal{O}(n)$.*

Puisque $\mathcal{H} \leq \log_2(n)$, ces deux bornes coïncident bien l'une avec l'autre. Ainsi, le coût des fusions de TimSort peut effectivement être de l'ordre de $3/2n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$, et ce même dans le cas le plus défavorable, où l'on a déjà $\mathcal{H} = \log_2(n) + \mathcal{O}(1)$.

Afin de faire baisser cette constante de $3/2$ à 1, il était donc important de s'intéresser à d'autres stratégies de fusion. Dès lors que l'on a un tel objectif en tête, un premier espoir vient de l'algorithme ShiversSort, inventé par Olin Shivers [18]. On peut obtenir cet algorithme en omettant les cas n° 1 et 2 de ShiversSort adaptatif, c'est-à-dire en utilisant la boucle principale suivante :

tant que vrai :		▷ boucle principale
si $h \geq 2$ et $\ell_1 \geq \ell_2$: fusionner les <i>runs</i> R_1 et R_2	▷ cas n° 3
sinon, si $\text{runs} \neq \emptyset$: ôter un <i>run</i> R de <i>runs</i> et l'insérer dans la pile \mathcal{P}	▷ cas n° 4
sinon	: sortir de la boucle principale	

Contrairement à TimSort et à ShiversSort adaptatif, ShiversSort peut fusionner un *run* R dès son insertion dans la pile, et ce y compris si R est beaucoup plus long que les autres *runs* de la pile. Par conséquent, cet algorithme ne s'adapte pas au nombre de *runs*, ni à leurs longueurs. Il jouit néanmoins d'une propriété remarquable, puisque son coût des fusions s'avère optimal (à un terme additif linéaire en n près), dans le pire des cas, si l'on se restreint à choisir n comme seul paramètre. C'est l'objet du résultat suivant, démontré dans [4, 18].

Théorème 2. *Le coût des fusions de ShiversSort, sur des tableaux de longueur n , est inférieur ou égal à $n \log_2(n) + \mathcal{O}(n)$. En outre, il existe des tableaux de longueur n et qui se décomposent en ρ sous-suites monotones pour lesquels le coût des fusions de ShiversSort est de l'ordre de $\omega(n \log_2(\rho))$.*

La preuve de ce résultat, que nous éludons ici, est très semblable à notre propre analyse de la complexité de ShiversSort adaptatif, menée ci-après. Un élément clé des deux démonstrations, et qui sera énoncé dans le Lemme 5, est le fait que la suite $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_h$ soit strictement croissante à partir d'un certain rang : ce rang est 2 dans la preuve de [4], et il vaut 3 dans le Lemme 5. Cet invariant est remarquablement similaire à celui de TimSort, en ce qu'il impose aux longueurs des *runs* stockés dans la pile de croître à vitesse exponentielle. Cependant, c'est ce nouvel invariant qui nous permet de faire décroître la constante cachée dans la notation \mathcal{O} de $3/2$ à 1 .

Mentionnons enfin l'algorithme PowerSort, déjà cité dans l'introduction, et qui jouit d'excellentes garanties sur son temps d'exécution, puisque son coût des fusions est majoré par $n(\mathcal{H} + 2)$. Toutefois, il ne s'agit pas d'un algorithme *k-aware* pour quelque entier k que ce soit. En effet, la stratégie qu'utilise cet algorithme ne s'appuie pas uniquement sur les longueurs des *runs* stockés dans la pile, mais également sur leur positionnement au sein du tableau à trier, et cette stratégie s'avère donc plus compliquée que celle de TimSort.

Coût des fusions de ShiversSort adaptatif

Nous avons affirmé, dans l'introduction, que le coût des fusions de ShiversSort adaptatif était excellent, puisqu'il était égal à $n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$. C'est ce que nous allons démontrer dans cette section, où nous effectuons une première analyse de complexité de ShiversSort adaptatif. Le résultat central est donc le Théorème 3 ci-dessous, qui nous assure que le coût des fusions de ShiversSort adaptatif est de l'ordre de $n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$.

Théorème 3. *Le coût des fusions de ShiversSort adaptatif, sur les tableaux de taille n et d'entropie \mathcal{H} , est inférieur ou égal à $n(\mathcal{H} + 19)$.*

Remarque. Comme nous pourrons l'illustrera le Théorème 12, la constante 19 est grossièrement surévaluée. Cependant, elle est plus facile à obtenir que d'autres constantes plus fines, et c'est pourquoi nous nous en contenterons pour l'instant.

Dans la suite, nous noterons r la longueur d'un *run* R , et ℓ l'entier $\lfloor \log_2(r) \rfloor$. On dira que ℓ est le *niveau* du *run* R . Nous adapterons librement ces notations en fonction du nom des runs considérés. Ainsi, nous utiliserons sans autre forme d'avertissement les notations r' et ℓ' pour désigner la longueur d'un *run* R' et l'entier $\lfloor \log_2(r') \rfloor$. De surcroît, il nous arrivera fréquemment de nous intéresser aux *runs* contenus dans la pile à un moment donné de l'exécution de l'algorithme. On notera alors (R_1, \dots, R_h) cette pile et h sa hauteur, le *run* R_k étant situé en $k^{\text{ème}}$ position en partant du haut. Puis, comme précédemment, on notera r_k et ℓ_k la longueur de R_k et l'entier $\lfloor \log_2(r_k) \rfloor$.

Forts de ces quelques notations, nous pouvons maintenant démontrer deux lemmes concernant les niveaux des *runs* manipulés lors d'une exécution de l'algorithme.

Lemme 4. *Lorsque deux runs R et R' sont fusionnés en un unique run R'' , on a $\ell' \leq \max\{\ell, \ell'\} + 1$.*

Démonstration. Sans perte de généralité, on peut supposer que $r \leq r'$. On constate alors que

$$2^{\ell''} \leq r'' = r + r' \leq 2r' < 2 \times 2^{\ell'+1} \leq 2^{\ell'+2},$$

et donc que $\ell'' \leq \ell' + 1$. □

Lemme 5. *Soit $\mathcal{P} = (R_1, \dots, R_h)$ la pile obtenue à un moment quelconque de l'exécution de la boucle principale de ShiversSort adaptatif. Alors*

$$(1) \quad \ell_2 \leq \ell_3 < \ell_4 < \dots < \ell_h.$$

Démonstration. Nous allons procéder par récurrence sur le nombre d'étapes (inscriptions d'un *run* dans la pile ou fusions de deux *runs*) déjà effectuées par l'algorithme. Tout d'abord, si $h \leq 2$, il n'y a rien à démontrer ; cette situation se produit entre autres au début de l'algorithme.

Démontrons maintenant que, si une pile $\mathcal{P} = (R_1, \dots, R_h)$ satisfait (1) et est transformée en une pile $\overline{\mathcal{P}} = (\overline{R}_1, \dots, \overline{R}_{\bar{h}})$ par une fusion des *runs* R_1 et R_2 , ou bien R_2 et R_3 , ou bien par l'insertion d'un nouveau *run* \overline{R}_1 , la nouvelle pile $\overline{\mathcal{P}}$ satisfait elle aussi (1). Pour ce faire, procédons par disjonction de cas :

— Si l'on vient de fusionner deux *runs*, alors on sait que $\bar{h} = h - 1$, que $\overline{R}_i = R_{i+1}$ pour tout $i \geq 3$, et que le *run* \overline{R}_2 est égal à R_3 (si l'on vient de fusionner R_1 et R_2) ou bien au produit de la fusion des *runs* R_2 et R_3 (si ce sont ces deux *runs* que l'on vient de fusionner). En vertu du Lemme 4, il s'ensuit que $\overline{\ell}_2 = \ell_3$ ou bien que $\overline{\ell}_2 \leq \max\{\ell_2, \ell_3\} + 1 = \ell_3 + 1$; dans tous les cas, on a bien $\overline{\ell}_2 \leq \ell_3 + 1$. Par ailleurs, puisque la pile \mathcal{P} satisfait (1) on sait déjà que $\ell_3 < \ell_4 = \bar{\ell}_3 < \overline{\ell}_4 < \dots < \overline{\ell}_{\bar{h}}$. On en déduit que $\overline{\ell}_2 \leq \ell_3 + 1 \leq \bar{\ell}_3$, de sorte que la pile $\overline{\mathcal{P}}$ satisfait elle aussi (1).

— Si l'on vient d'insérer le *run* \bar{R}_1 dans la pile, alors on sait que $\bar{h} = h + 1$ et que $\bar{R}_i = R_{i-1}$ pour tout $i \geq 2$. Puisque la pile \mathcal{P} satisfait (1), on en déduit donc déjà que $\bar{\ell}_4 < \bar{\ell}_5 < \dots < \bar{\ell}_{\bar{h}}$. En outre, puisque l'on vient de déclencher le cas n° 4, la pile \mathcal{P} ne satisfait aucune des conditions pour déclencher les cas n° 1 à 3. Cela signifie que $\ell_1 < \ell_2 < \ell_3$ ou encore que $\bar{\ell}_2 < \bar{\ell}_3 < \bar{\ell}_4$. On en conclut que la pile \mathcal{P} satisfait elle aussi (1).

□

Le Lemme 5 stipule que les longueurs des *runs* stockés dans la pile augmentent à vitesse exponentielle (au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sommet de la pile) ; la seule exception éventuelle était le *run* situé au sommet de la pile, et sur la longueur duquel nous n'avons aucun contrôle. Comme annoncé en pages 12 et 13, ce genre de propriété s'est avéré fondamental dans les analyses de complexité d'algorithmes tels que ShiversSort, TimSort et α -MergeSort.

La démonstration du Théorème 3 consiste dès lors en une évaluation soigneuse du coût des fusions qu'exécute l'algorithme. À cette fin, nous allons distinguer trois types de fusions : les fusions *équilibrées*, entre deux *runs* R et R' tels que $\ell = \ell'$; les fusions *déséquilibrées*, entre deux *runs* R et R' tels que $\ell \neq \ell'$ et survenues dans la boucle principale ; enfin, les fusions *tardives*, entre deux *runs* R et R' tels que $\ell \neq \ell'$ et survenues en dernière ligne de l'algorithme.

Dans la suite, le coût de chaque fusion équilibrée entre deux *runs* R et R' sera alloué équitablement aux éléments des deux *runs* concernés : chaque élément paiera un coût de 1, ce qui permettra bien de couvrir le coût total de la fusion, égal à $r + r'$. Au contraire, le coût de chaque fusion déséquilibrée sera intégralement alloué aux éléments du dernier *run* R^\bullet à avoir été inséré dans la pile : chacun de ses r^\bullet éléments devra payer un coût de $(r + r')/r^\bullet$. Enfin, nous verrons comment traiter à peu de frais le cas des fusions tardives.

Munis de cette politique d'allocation des coûts, nous pouvons dès à présent évaluer le coût des fusions équilibrées.

Lemme 6. *Le coût total des fusions équilibrées est inférieur ou égal à $n(\mathcal{H} + 1)$.*

Démonstration. Lors d'une exécution de l'algorithme, les éléments d'un *run* R de taille initiale r peuvent prendre part à un maximum de

$$\lfloor \log_2(n) \rfloor - \ell = \lfloor \log_2(n) \rfloor - \lfloor \log_2(r) \rfloor \leq \log_2(n) - \log_2(r) + 1 = \log_2(n/r) + 1$$

fusions équilibrées : chaque élément paiera donc au plus $\log_2(n/r) + 1$ au titre de ces fusions équilibrées. Par conséquent, si le tableau se décompose initialement en des *runs* de longueurs r_1, r_2, \dots, r_ρ , la somme des coûts des fusions équilibrées est inférieure ou égale à $\sum_{i=1}^\rho r_i(\log_2(n/r_i) + 1) = n(\mathcal{H} + 1)$. □

Nous allons maintenant évaluer le coût des fusions déséquilibrées. Dans ce but, distinguons également deux types de piles : on dira qu'une pile $\mathcal{P} = (R_1, \dots, R_h)$ est *stable* si $h \leq 1$ ou si $h \geq 2$ et $\ell_1 \leq \ell_2$, et qu'elle est *instable* si $h \geq 2$ et $\ell_1 > \ell_2$. Les piles stables jouissent de remarquables propriétés de stabilité (d'où leur nom) et sont faciles à obtenir, comment le soulignent les deux résultats suivants.

Lemme 7. *Soit \mathbf{F} une opération de fusion exécutée durant la boucle principale de ShiversSort adaptatif. Soit \mathcal{P} et $\overline{\mathcal{P}}$ les piles obtenues juste avant que \mathbf{F} ne soit exécutée et juste après que \mathbf{F} a été exécutée. Si \mathcal{P} est une pile stable, alors \mathbf{F} est une fusion équilibrée, et $\overline{\mathcal{P}}$ est stable également.*

Démonstration. Soit (R_1, \dots, R_h) et $(\overline{R}_1, \dots, \overline{R}_{h-1})$ les *runs* respectivement contenus dans les piles \mathcal{P} et $\overline{\mathcal{P}}$. Sans perte de généralité, et quitte à ajouter tout en bas de la pile \mathcal{P} un *run* R_{h+1} de longueur $2(r_1 + \dots + r_h)$, qui n'influera ni sur le caractère stable de \mathcal{P} , ni sur la fusion \mathbf{F} et le cas qui l'a provoquée, ni sur le fait que (1) soit vraie, on suppose que $h \geq 3$.

Puisque \mathcal{P} est stable, (1) nous assure déjà que $\ell_1 \leq \ell_2 \leq \ell_3$. On procède alors par disjonction de cas, en fonction du cas qui a provoqué la fusion \mathbf{F} .

— Si \mathbf{F} a été provoquée par l'un des cas n° 1 ou 2, c'est que $\ell_1 \geq \ell_3$ ou $\ell_2 \geq \ell_3$, donc que $\ell_1 \leq \ell_2 = \ell_3$. Comme \mathbf{F} est une fusion entre les *runs* R_2 et R_3 , cette fusion est donc équilibrée. Elle produit un *run* \overline{R}_2 tel que $\overline{\ell}_2 \geq \ell_2$ et, puisque $\overline{R}_1 = R_1$, on en conclut que $\overline{\ell}_1 = \ell_1 \leq \ell_2 \leq \overline{\ell}_2$. Cela signifie bien que $\overline{\mathcal{P}}$ est une pile stable.

— Si \mathbf{F} a été provoquée par le cas n° 3, c'est que $\ell_3 > \ell_1 \geq \ell_2$, ce sans quoi on aurait déjà déclenché le cas n° 1, et donc que $\ell_1 = \ell_2 < \ell_3$. Comme \mathbf{F} est une fusion entre les *runs* R_1 et R_2 , cette fusion est donc équilibrée. En outre, en vertu du Lemme 4, elle produit un *run* \overline{R}_1 tel que $\overline{\ell}_1 \leq \ell_1 + 1$. Puisque $\ell_1 < \ell_3$ et que $\overline{R}_2 = R_3$, il s'ensuit que $\overline{\ell}_1 \leq \ell_3 = \overline{\ell}_2$. Cela signifie ici aussi que $\overline{\mathcal{P}}$ est une pile stable.

□

Lemme 8. *Soit \mathbf{F} une opération de fusion exécutée durant la boucle principale de ShiversSort adaptatif, et soit $\overline{\mathcal{P}}$ la pile obtenue juste après que \mathbf{F} a été exécutée. Si \mathbf{F} a été provoquée par l'un des cas n° 2 ou 3, alors $\overline{\mathcal{P}}$ est une pile stable.*

Démonstration. Soit \mathcal{P} la pile obtenue juste avant que \mathbf{F} ne soit exécutée, et soit (R_1, \dots, R_h) et $(\overline{R}_1, \dots, \overline{R}_{h-1})$ les *runs* respectivement contenus dans les piles \mathcal{P} et $\overline{\mathcal{P}}$. Comme dans la démonstration du Lemme 7, et quitte à ajouter tout en bas de la pile \mathcal{P} un *run* R_{h+1} de longueur $2(r_1 + \dots + r_h)$, on suppose que $h \geq 3$.

Tout d'abord, si \mathcal{P} est stable, le Lemme 7 nous assure déjà que $\overline{\mathcal{P}}$ est stable elle aussi. On suppose donc ci-dessous que \mathcal{P} est instable et que \mathbf{F} n'a pas été provoquée par le cas n° 1, ce qui signifie que $\ell_2 < \ell_1 < \ell_3$. Dans ces conditions, la fusion \mathbf{F} n'a pu être provoquée que par le cas n° 3. Ainsi, \overline{R}_1 est le produit de la fusion entre les

deux *runs* R_1 et R_2 , et le Lemme 7 nous assure que $\bar{\ell}_1 \leq \ell_1 + 1$. Puisque $\bar{R}_2 = R_3$, on en conclut que $\bar{\ell}_1 \leq \ell_3 = \bar{\ell}_2$, ce qui signifie bien que $\bar{\mathcal{P}}$ est une pile stable. \square

Ces deux résultats nous permettent alors d'obtenir l'estimation suivante sur le coût que devront payer les éléments d'un *run* au titre des fusions déséquilibrées, et dont le Corollaire 10 découle immédiatement.

Lemme 9. *Soit R un run initial du tableau que ShiversSort adaptatif est en train de trier. Le coût total des fusions déséquilibrées pour lesquelles devront payer les éléments de R est inférieur ou égal à $10r$.*

Démonstration. Soit $\mathcal{P} = (R_1, \dots, R_h)$ la pile obtenue juste avant que le *run* R n'y soit inséré, et soit $s = r + r_1 + \dots + r_h$. Comme dans les démonstrations des lemmes précédents, et quitte à ajouter tout en bas de la pile \mathcal{P} des *runs* R_{h+1} , R_{h+2} et R_{h+3} de longueurs respectives $2s$, $4s$ et $8s$, qui n'auront aucune influence sur la boucle principale de l'algorithme, on suppose que $h \geq 3$ et que $\ell_h > \ell$.

Puisque l'insertion du *run* R a été provoquée par le cas n° 4, on sait que $\ell_1 < \ell_2 < \ell_3$, ce sans quoi on aurait déclenché l'un des cas n° 1 à 3. On déduit donc de (1) que $\ell_1 < \dots < \ell_h$. Dans ces conditions, soit k le plus petit entier tel que $\ell_{k+1} > \ell$; puisque l'on a supposé que $\ell_h > \ell$, un tel entier k existe bien.

Tout d'abord, si $\ell < \ell_1$, les éléments du *run* R ne devront payer le coût d'aucune fusion déséquilibrée, et le résultat du lemme 9 est déjà acquis. On suppose donc ci-dessous que $\ell \geq \ell_1$, de sorte que $k \geq 1$ et que $\ell_k \leq \ell$.

L'algorithme ShiversSort adaptatif nous impose alors de commencer par $k-1$ fusions, toutes provoquées par le cas n° 1, entre les *runs* R_1 et R_2 , puis entre le *run* issu de cette fusion et R_3 , et ainsi de suite jusqu'à fusionner R_k . Le coût total de toutes ces fusions est égal à $C = -r_1 + \sum_{i=1}^k (k+1-i)r_i$, et il en résulte un *run* \bar{R}_2 de longueur $\bar{r}_2 = \sum_{i=1}^k r_i$.

Une fois que toutes ces fusions ont été exécutées, on obtient une pile $\bar{\mathcal{P}} = (\bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_{h+1-k})$, avec $\bar{R}_1 = R$ et $\bar{R}_i = R_{i+k-1}$ pour tout $i \geq 3$; le *run* \bar{R}_2 est le *run* issu de toutes les fusions précédentes. On constate alors, puisque $\bar{\mathcal{P}}$ vérifie (1), que $\bar{\ell}_1 < \bar{\ell}_3 < \bar{\ell}_4 < \dots < \bar{\ell}_h$.

On distingue alors deux cas, selon que la pile $\bar{\mathcal{P}}$ est stable ou non.

— Si $\bar{\mathcal{P}}$ est stable, alors le Lemme 7 indique que toutes les fusions qui suivront, et ce jusqu'à ce que l'on insère un nouveau *run* dans la pile ou que l'on sorte de la boucle principale, seront des fusions équilibrées. Dans ce cas, les éléments de R n'auront donc plus à payer de fusion déséquilibrée.

— Si $\bar{\mathcal{P}}$ est instable, alors $\bar{\ell}_2 < \bar{\ell}_1 < \bar{\ell}_3$, donc l'algorithme déclenche le cas n° 3 et fusionne les *runs* \bar{R}_1 et \bar{R}_2 , pour un coût de $\bar{r}_1 + \bar{r}_2 \leq 2\bar{r}_1 = 2r$. Le Lemme 8 nous assure que la pile qui résulte de cette fusion est stable, et le même raisonnement que ci-dessus nous montre que les éléments de R n'auront plus à payer de fusion déséquilibrée ultérieure.

Par conséquent, les seules fusions déséquilibrées que doivent payer les éléments de R sont certaines des $k - 1$ fusions initiales, provoquées par le cas n° 1, ainsi que l'éventuelle fusion entre \bar{R}_1 et \bar{R}_2 qui aura pu s'ensuivre. Le coût total de ces fusions déséquilibrées est donc inférieur ou égal à $C' = C + 2r$.

Or, puisque l'on a vu que $\ell_1 < \dots < \ell_h$ et que $\ell_k \leq \ell$, on sait en fait que $r_i < 2^{\ell_i+1} \leq 2^{\ell+i+1-k} \leq 2^{i+1-k}r$ pour tout $i \leq k$. On en déduit que

$$C \leq \sum_{i=1}^k (k+1-i)r_i \leq \sum_{i=1}^k (k+1-i)2^{i+1-k}r \leq \sum_{i=-\infty}^k (k+1-i)2^{i+1-k}r = 8r,$$

de sorte que $C' = C + r + \bar{r}_2 \leq 10r$. \square

Corollaire 10. *Le coût total des fusions déséquilibrées est inférieur ou égal à $10n$.*

Il nous reste, enfin, à évaluer le coût des fusions tardives, ce que l'on fait on suivant le modèle que nous a fourni la démonstration précédente.

Lemme 11. *Le coût total des fusions tardives est inférieur ou égal à $8n$.*

Démonstration. Soit $\mathcal{P} = (R_1, \dots, R_h)$ la pile obtenue au moment où se termine la boucle principale de ShiversSort adaptatif. On sait que $\ell_1 < \ell_2 < \ell_3$, ce sans quoi on aurait déclenché l'un des cas n° 1 à 3 au lieu de sortir de la boucle principale. On déduit donc de (1) que $\ell_1 < \dots < \ell_h$.

L'algorithme ShiversSort adaptatif nous impose alors de procéder à $h - 1$ fusions, entre les *runs* R_1 et R_2 , puis entre le *run* issu de cette fusion et R_3 , et ainsi de suite jusqu'à fusionner R_h . Le coût total de toutes ces fusions est égal à $C = -r_1 + \sum_{i=1}^h (h+1-i)r_i$; ce coût inclut la somme des coûts des fusions tardives aussi bien que d'éventuelles fusions équilibrées.

Or, on sait que $r_i < 2^{\ell_i+1} \leq 2^{\ell_h+i+1-h} \leq 2^{i+1-h}r_h \leq 2^{i+1-h}n$ pour tout $i \leq h$. On en déduit que

$$C \leq \sum_{i=1}^h (h+1-i)r_i \leq \sum_{i=1}^h (h+1-i)2^{i+1-h}n \leq \sum_{i=-\infty}^h (h+1-i)2^{i+1-h}n = 8n,$$

ce qui conclut. \square

Compléments et détails d'implémentation

Dans cette section conclusive, nous donnons quelques détails permettant, selon les cas, d'améliorer les résultats démontrés précédemment ou bien de simplifier l'implémentation que l'on ferait de ShiversSort adaptatif. Pour des raisons de concision, les résultats mentionnés ci-dessous n'ont pas vocation à être démontrés ici. Le lecteur curieux pourra se référer à la version complète de cet article (en anglais) [11].

Une meilleure borne supérieure sur le coût des fusions.

Nous avons formulé en page 14 la remarque suivante : le Théorème 3 nous indique certes que ShiversSort adaptatif jouit d'un coût des fusions de l'ordre de $n\mathcal{H} + \mathcal{O}(n)$, mais la constante cachée dans la notation \mathcal{O} est assez élevée. Cependant, on peut en fait améliorer grandement cette constante. C'est l'objet du résultat suivant.

Théorème 12. *Le coût des fusions de ShiversSort adaptatif, sur les tableaux de taille n et d'entropie \mathcal{H} , est inférieur ou égal à $n(\mathcal{H} + \Delta)$, où $\Delta = 24/5 - \log_2(5) \approx 2.478$.*

On peut en outre démontrer que la constante Δ mentionnée ici est optimale, comme en témoigne l'exemple ci-dessous.

Exemple. Soit $k \geq 3$ un entier, et soit $m = 2^k$. Considérons un tableau T de longueur $n = 5m$, et qui se décompose en sept *runs* de longueurs respectives $r_1 = 2$, $r_2 = 2m - 10$, $r_3 = 2$, $r_4 = m + 1$, $r_5 = 2$, $r_6 = 2m + 2$ et $r_7 = 1$. Alors ce tableau est d'entropie $\mathcal{H} = \log_2(5) - 4/5 + o(1)$ et le coût des fusions de ShiversSort adaptatif sur le tableau T est égal à $c = 20m - 23 = n(\mathcal{H} + \Delta + o(1))$.

Une borne inférieure sur le coût des fusions.

Nous avons mentionné, dans l'introduction, que le coût des fusions d'un algorithme de tri fusion naturel était d'au moins $n\mathcal{H}$, même dans le meilleur des cas. Ce résultat, qui est en fait une conséquence du premier théorème de Shannon [17], peut également être démontré directement, par exemple au moyen du lemme suivant, et en se rappelant qu'un tableau entièrement trié est d'entropie nulle.

Lemme 13. *Soit T un tableau de longueur n et d'entropie \mathcal{H} , formé de ρ runs R_1, \dots, R_ρ , avec $\rho \geq 2$. Puis, étant donné un entier $k \leq \rho - 1$, soit \bar{T} le tableau, d'entropie $\bar{\mathcal{H}}$, obtenu en fusionnant R_k et R_{k+1} . Alors $r_k + r_{k+1} \geq n(\mathcal{H} - \bar{\mathcal{H}})$.*

Démonstration. Posons $\bar{r} = r_k + r_{k+1}$, puis $x = r_k/\bar{r}$ et $y = r_{k+1}/\bar{r}$. Puisque la fonction $t \mapsto -t \log_2(t)$ est concave, on constate alors comme prévu que

$$n(\mathcal{H} - \bar{\mathcal{H}}) = -\bar{r}(x \log_2(x) + y \log_2(y)) \leq -\bar{r}(x + y) \log_2((x + y)/2) = \bar{r}.$$

□

Implémentation en pratique.

Au vu de la présentation de ShiversSort adaptatif en page et des implémentations actuelles de TimSort en Python et en Java, trois questions se posent naturellement.

(1) Quelle est la taille maximale de la pile \mathcal{P} ?

Au vu de l'invariant (1), on sait que, dans une pile \mathcal{P} de taille $h \geq 3$, on a $\ell_h \geq \ell_3 + (h - 3) \geq h - 3$. Puisque $\ell_h \leq \log_2(n)$, on en déduit que la pile \mathcal{P} sera de taille $h \leq \log_2(n) + 3$.

En pratique, puisque les petits *runs* sont déjà fusionnés par une méthode *ad hoc*, les tailles des piles déjà utilisées en Python et en Java sont en fait suffisantes.

(2) On peut manifestement fusionner les cas n° 1 et 2; peut-on faire mieux ?

Il se trouve que la réponse est positive. En effet, on peut montrer que, à tout moment de l'exécution de l'algorithme, les prochains *runs* fusionnés seront les *runs* les plus à gauche (disons R_i et R_{i+1}) tels que $\ell_i \leq \max\{\ell_{i+1}, \ell_{i+2}\}$; ici, par convention, on a posé $\ell_{p+1} = +\infty$, de sorte qu'un tel entier i existe toujours. Par conséquent, on peut en fait omettre le cas n° 3, et ce sans changer les fusions qu'exécutera l'algorithme ni l'ordre dans lequel elles seront exécutées.

(3) Comment tester efficacement si $\ell_i \leq \ell_j$?

Au vu de la remarque précédente, il nous faudrait en fait tester si $\ell_i \leq \max\{\ell_{i+1}, \ell_{i+2}\}$. Dans ce cas, il suffit en fait d'exécuter le programme suivant, dont on laisse au lecteur le plaisir de démontrer qu'il nous fournit un résultat correct.

Entrée : Longueurs r_i , r_{i+1} et r_{i+2}

Résultat : vrai si $\ell_i \leq \max\{\ell_{i+1}, \ell_{i+2}\}$, et faux sinon

Remarque: Les opérations **et**, **ou** et **non** sont des opérations bit-à-bit.

$x \leftarrow r_{i+1}$ **ou** r_{i+2}
renvoyer $x \geq ((\text{non } x) \text{ et } r_i)$

Toutes ces remarques illustrent la facilité que l'on aurait à remplacer l'utilisation de TimSort par celle de ShiversSort adaptatif. Ainsi, parmi les 908 lignes de l'implémentation actuelle de TimSort en Java (version 13), il suffirait de remplacer les lignes 405 à 412 par le code minimaliste suivant :

```
int n = stackSize - 3;
int x = runLen[n+1] | runLen[n+2];
if (n < 0 || ((~x) & runLen[n]) > x) {
    break;
}
```

Références

- [1] Nicolas Auger, Vincent Jugé, Cyril Nicaud et Carine Pivoteau. *On the worst-case complexity of Timsort*. 26th Annual European Symposium on Algorithms (ESA), LIPIcs vol. 112, pages 4:1–13, 2018.
- [2] Nicolas Auger, Cyril Nicaud et Carine Pivoteau. *Merge strategies : from merge sort to Timsort*. Rapport technique HAL : hal-01212839, 2015.

- [3] Jérémie Barbay et Gonzalo Navarro. *On compressing permutations and adaptive sorting*. Theoretical Computer Science, pages 513 :109–123, 2013.
- [4] Sam Buss et Alexander Knop. *Strategies for stable merge sorting*. 30th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), pages 1272–1290. SIAM, 2019.
- [5] Stijn De Gouw, Jurriaan Rot, Frank de Boer, Richard Bubel et Reiner Hähnle. *OpenJDK's Java.utils.Collection.sort() is broken : The good, the bad and the worst case*. 27th International Conference on Computer Aided Verification (CAV), pages 273–289. Springer, 2015.
- [6] Edsger Dijkstra. *Smoothsort, an alternative for sorting in situ*. Theoretical Foundations of Programming Methodology, pages 3–17. Springer, 1982.
- [7] Vladmir Estivill-Castro et Derick Wood. *A survey of adaptive sorting algorithms*. ACM Computing Surveys, vol. 24, issue 4, pages 441–476, 1992.
- [8] Herman Goldstine et John von Neumann. *Planning and coding of problems for an electronic computing instrument*. 1947.
- [9] Mordecai Golin et Robert Sedgewick. *Queue-mergesort*. Information Processing Letters, vol. 48, issue 5, pages 253–259, 1993.
- [10] Tony Hoare. *Algorithm 64 : Quicksort*. Communications of the ACM, vol. 4, issue 7, page 321, 1961.
- [11] Vincent Jugé. *Adaptive Shivers sort : an alternative sorting algorithm*. 31th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA). SIAM, 2020.
- [12] Donald Knuth. *The Art of Computer Programming, Volume 3 (2nd ed.) – Sorting and Searching*. Addison Wesley Longman Publish. Co., Redwood City, CA, USA, 1998.
- [13] Heikki Mannila. *Measures of presortedness and optimal sorting algorithms*. IEEE Transactions on Computers, vol. 34, issue 4, pages 318–325, 1985.
- [14] Alistair Moffat, Gary Eddy et Ola Petersson. *Splaysort : Fast, versatile, practical*. Software : Practice and Experience, vol. 26, issue 7, pages 781–797, 1996.
- [15] J. Ian Munro et Sebastian Wild. *Nearly-optimal mergesorts : Fast, practical sorting methods that optimally adapt to existing runs*. 26th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2018), LIPIcs vol. 112, pages 63 :1–15, 2018.
- [16] Tim Peters. *TimSort description*. <http://svn.python.org/projects/python/trunk/Objects/listsort.txt>.
- [17] Claude Shannon. *A mathematical theory of communication*. Bell system technical journal, vol. 27, issue 3, pages 379–423, 1948.
- [18] Olin Shivers. *A simple and efficient natural merge sort*. Rapport de recherche, Georgia Institute of Technology, 2002.
- [19] Tadao Takaoka. *Partial solution and entropy*. 34th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS), pages 700–711. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [20] John Williams. *Algorithm 232 : Heapsort*. Communications of the ACM, vol. 7, pages 347–348, 1964.



Techniques d'anonymisation tabulaire : concepts et mise en œuvre

Benjamin Nguyen¹ et Claude Castelluccia²

Dans ce document³, nous présentons l'état de l'art des techniques d'anonymisation pour des bases de données classiques (i.e. des tables), à destination d'un public technique ayant une formation universitaire de base en mathématiques et informatique, mais non spécialiste. L'objectif de ce document est d'expliquer les concepts permettant de réaliser une anonymisation de données tabulaires, et de calculer les risques de réidentification. Le document est largement composé d'exemples permettant au lecteur de comprendre comment mettre en œuvre les calculs.

Introduction : le secret statistique

En France, il existe depuis 1951 la loi sur *l'obligation, la coordination, et le secret en matière de statistiques* [1]. L'histoire permet aisément de comprendre pourquoi ces questions ont vu le jour à la sortie de la seconde guerre mondiale. L'idée fondamentale défendue dans cette loi est que « *les renseignements individuels (...) et ayant trait à la vie personnelle et familiale et, d'une manière générale, aux faits et comportements d'ordre privé, ne peuvent faire l'objet d'aucune communication* ». De même en ce qui concerne l'Europe, ce principe est affirmé par l'article 338 du traité de l'Union [4] : « *L'établissement des statistiques se fait dans le respect de l'impartialité, de la fiabilité, de l'objectivité, de l'indépendance scientifique, de l'efficacité* ».

1. INSA Centre Val de Loire, Laboratoire d'informatique fondamentale d'Orléans.

2. Inria Grenoble Rhône-Alpes.

3. Également publié sur arxiv <https://arxiv.org/abs/2001.02650>.



au regard du coût et de la confidentialité des informations statistiques ». L'idée fondamentale qui existe depuis près de 70 ans est donc qu'il faut toujours s'assurer de la confidentialité des données privées lors d'opérations de traitement de données. L'Insee a publié un guide du secret statistique [24], précisant que « *pour les tableaux fournissant des données agrégées sur les personnes physiques, le secret statistique impose qu'on ne puisse pas connaître ou déduire des informations les concernant* ». Il est intéressant de noter que ce guide n'explique pas comment atteindre le secret statistique, mais montre des cas simples où le secret statistique n'est pas réalisé : « *Par exemple, si un tableau donne pour une commune la répartition par âge et situation matrimoniale, et que toutes les personnes âgées de 50 à 59 ans ont toutes pour état matrimonial « divorcé », le secret statistique n'est plus respecté dans ce tableau. En effet, si l'on sait par ailleurs que quelqu'un a entre 50 et 59 ans, le tableau nous informe que cette personne est divorcée* ». Nous verrons que ce problème persiste pour certaines techniques d'anonymisation.

Anonymisation : les principes

L'anonymisation dans la législation

Depuis 1978 et la loi « Informatique et libertés » [2], le principe de protection affirmé par la loi a évolué. En effet, les lois relatives au traitement de données personnelles précisent ce qu'est une telle donnée, ce qui permet de savoir par contraposée ce qu'est une donnée anonymisée : « *Constitue une donnée à caractère personnel toute information relative à une personne physique identifiée ou qui peut être identifiée, directement ou indirectement, par référence à un numéro d'identification ou à un ou plusieurs éléments qui lui sont propres. Pour déterminer si une personne est identifiable, il convient de considérer l'ensemble des moyens en vue de permettre son identification dont dispose ou auxquels peut avoir accès le responsable du traitement ou toute autre personne* ». La législation française était donc, à l'origine, très rigide concernant une donnée anonyme, puisque la définition avait trait à une obligation de résultat (impossibilité que quiconque puisse remonter à la donnée originale). Nous verrons qu'une telle contrainte n'est pas compatible avec les méthodes d'anonymisation proposées, qui conservent toujours un risque de réidentification. Par conséquent, avec cette définition, toute donnée devrait être considérée comme une donnée personnelle, ce qui n'est clairement pas l'objectif recherché. En effet, nous allons voir qu'il est possible de quantifier la probabilité du risque de réidentification, et on pourra ainsi estimer qu'une donnée sera anonyme si ce risque est acceptable.

Exemple 1 (Données anonymes pré-RGPD). *Un enregistrement, même utilisant un algorithme de chiffrement réputé sûr comme AES, ayant produit le n-uplet suivant (Nom : sEujSEsWzHioxae70aKE6w==, Âge : 27, Salaire : 36800K, Département :*

75) n'est pas anonyme *dans la mesure où la personne ayant chiffré le n-uplet est capable de le déchiffrer, puisqu'elle connaît la clé de chiffrement utilisée*⁴.

Depuis mai 2018 et l'entrée en vigueur du règlement général sur la protection des données [3] (RGPD ou GDPR en anglais), cette obligation de résultat s'est transformée en obligation de moyens (cf. RGPD, considérant 26), éclairant l'interprétation de la signification de ce qu'est une donnée identifiante : « *Il y a lieu d'appliquer les principes relatifs à la protection des données à toute information concernant une personne physique identifiée ou identifiable. (...) Pour déterminer si une personne physique est identifiable, il convient de prendre en considération l'ensemble des moyens raisonnablement susceptibles d'être utilisés par le responsable du traitement ou par toute autre personne pour identifier la personne physique directement ou indirectement, tels que le ciblage. Pour établir si des moyens sont raisonnablement susceptibles d'être utilisés pour identifier une personne physique, il convient de prendre en considération l'ensemble des facteurs objectifs, tels que le coût de l'identification et le temps nécessaire à celle-ci, en tenant compte des technologies disponibles au moment du traitement et de l'évolution de celles-ci*

La définition d'une donnée identifiante dans la loi française est désormais celle référencée dans l'article 4 du RGPD. Il semble donc raisonnable de considérer la définition relaxée à l'obligation de moyens. Faute de cette interprétation, chercher à anonymiser des données tout en conservant une certaine utilité ne fait pas sens. Il faut donc accepter une part de risque de réidentification lorsqu'un processus d'anonymisation a lieu, et chercher à quantifier la probabilité de désanonymisation, l'impact, mais également le bénéfice qui pourra être obtenu suite au traitement des données. La définition de l'anonymisation se fait donc par rapport à la question de la réidentification.

Exemple 2 (Données anonymes post-RGPD). *Considérons la table 2, générée en anonymisant une partie des données⁵ de la table 1 (on a gardé uniquement les joueurs du PSG). La première ligne est une valeur hachée du nom utilisant une clé de chiffrement qui a été détruite (effacée). Dans ce cas, même si un attaquant connaît l'âge de la personne et son club, elle ne sera pas capable de déduire son salaire avec une probabilité supérieure à 50 %. Par exemple, Cavani, âgé de 32 ans et jouant au PSG peut avoir un salaire de 1,16 million ou 1,5 million.*

4. Pour ceux qui s'y intéressent, la clé de chiffrement utilisée ici est une clé basique : « ~~ZZZZZZZZZZZZZZZZ~~ ».

5. Ces salaires sont disponibles en accès libre dû au règlement sur le *fair play financier* de l'UEFA (Union européenne des associations de football). On pourrait s'interroger sur l'impact de ce règlement sur le droit à la vie privée des joueurs. Les données ont été extraites de <https://www.linternaute.com/sport/foot/1433459-salaires-de-ligue-1-le-nom-du-joueur-le-mieux-paye-revele-vendredi/>.

<i>ID</i>	<i>Âge</i>	<i>Club</i>	<i>Salaire</i>
<i>Thiago Silva</i>	35	<i>PSG</i>	<i>1160K</i>
<i>Edison Cavani</i>	32	<i>PSG</i>	<i>1500K</i>
<i>Kylian Mbappé</i>	20	<i>PSG</i>	<i>1730K</i>
<i>Neymar Jr.</i>	27	<i>PSG</i>	<i>3060K</i>
<i>Dimitri Payet</i>	32	<i>OM</i>	<i>500K</i>
<i>Luiz Gustavo</i>	32	<i>OM</i>	<i>500K</i>

TABLE 1. Salaires 2019

<i>ID</i>	<i>Âge</i>	<i>Club</i>	<i>Salaire</i>
<i>dH7SdankclhHDE1ATvErkg</i>	[30;39]	<i>PSG</i>	<i>1160K</i>
<i>fTRVz9bY2mHguqsmuPHrvw</i>	[30;39]	<i>PSG</i>	<i>1500K</i>
<i>x4TUcj1FQZkfSfnleL05NA</i>	[20;29]	<i>PSG</i>	<i>1730K</i>
<i>jILvRsZLVUETwlExAzwvw</i>	[20;29]	<i>PSG</i>	<i>3060K</i>

TABLE 2. Salaires 2019 du PSG, table anonymisée

Objectif d'un processus d'anonymisation

Nous notons \mathcal{D} une base de données, et $\mathcal{A}_X(\mathcal{D})$ sa version anonymisée selon un mécanisme \mathcal{A}_X .

Définition 14 (Réidentification). La réidentification est un processus (ou algorithme) prenant en entrée un jeu de données (anonymes), des connaissances annexes et cherchant à apparier des données anonymes avec des individus du monde réel.

Exemple 3 (Réidentification). *Considérons de nouveau la table 2. Supposons que la connaissance annexe d'un attaquant soit de savoir qu'il n'y a que trois joueurs du PSG qui gagnent plus de 1,5 million d'euros par mois (Neymar Jr., Mbappé et Cavani), et que l'âge de Cavani est de 32 ans, alors il est possible à cet attaquant de déduire le salaire de Cavani de la table 2 (1,5 million).*

Un processus d'anonymisation doit idéalement protéger contre toute réidentification, et doit *a minima* quantifier le risque de réidentification de la base de données. Cette réidentification peut être quantifiée par rapport à différents modèles [19] : le modèle du journaliste, du procureur, et du marketeur. Le modèle du journaliste considère que l'attaque est réussie si l'attaquant (le journaliste) arrive à désanonymiser n'importe quelle personne du jeu de données, et à la retrouver dans le monde réel. Le modèle du procureur considère que l'individu auquel on s'intéresse est dans la base de données, qu'on connaît toutes les informations sur lui, et que l'attaque est réussie si on réussit à le désanonymiser. Le modèle du marketeur cherche à apparier un maximum d'enregistrements pour lesquels on ne connaît que le quasi-identifiant (voir plus bas).

<i>Âge</i>	<i>Salaire</i>
35	1160K
32	1500K
20	1730K
27	3060K

TABLE 3. Résultats exacts : $Q1$

Exemple 4 (Risque du journaliste). *Toujours dans l'exemple de la table 2, le modèle du journaliste fera comme hypothèse que le journaliste connaît toutes les données publiques relatives aux individus présents dans la base. Il connaîtra donc l'âge et l'équipe des individus : (Mbappé, 20, PSG), (Neymar Jr, 27, PSG), (Cavani, 32, PSG), (Silva, 35, PSG). Ici, il est incapable de différencier Cavani de Silva et Mbappé de Neymar Jr. soit une chance sur deux à chaque fois. Le risque de retrouver au moins l'un des quatre individus est donc égal à : $R_J = 1 - (\frac{1}{2})^2 = 0.75$.*

Exemple 5 (Risque du procureur). *Le modèle du procureur fera comme hypothèse que le procureur connaît toutes les données publiques relatives à l'individu qui l'intéresse présent dans la base. Il connaîtra donc l'âge et l'équipe de : (Mbappé, 20, PSG). Ici, il est incapable de différencier Mbappé de Neymar Jr. Le risque de retrouver le salaire de Mbappé est donc égal à : $R_P('Mbappé') = \frac{1}{2} = 0.5$. On voit que le risque du procureur dépend de l'individu qu'il cherche à réidentifier. On peut donc définir le risque maximal du procureur comme étant $R_P = \max_{i \in \mathcal{D}} (R_P(i))$.*

Exemple 6 (Risque du marketeur). *Le modèle du marketeur fait la même hypothèse que celui du journaliste, toutefois il cherche à calculer le nombre d'appariements réussis. On peut le voir comme une espérance normalisée du nombre de réidentifications réussies. $R_M = \sum_{i \in \mathcal{D}} p(i) / |\mathcal{D}| = 0.5$.*

Définition 15 (Utilité). L'utilité $U(r(\mathcal{D}))$ d'une requête $r(\mathcal{D})$ d'analyse de données se mesure par une métrique M qui indique la différence entre la valeur de $U(r(\mathcal{D}))$ et la valeur de $U(r'(\mathcal{A}_X(\mathcal{D})))$, où r' peut être r ou une version modifiée de r pour prendre en compte le processus d'anonymisation.

Exemple 7 (Utilité du calcul du salaire par âge). *Supposons que nous souhaitons calculer le salaire par âge sur la base de données constituée des quatre joueurs de notre exemple. Le résultat est indiqué dans la table 3.*

Si nous lançons la même requête sur les données anonymisées nous obtiendrons le résultat présenté dans la table 4. Nous pouvons évaluer l'utilité du deuxième calcul grâce à la fonction d'utilité suivante, qui calcule la moyenne de l'erreur normalisée (toute autre fonction d'évaluation d'erreur pourrait être pertinente) : $M(U(Q_1(\mathcal{D}), U(Q'_1(\mathcal{A}_X(\mathcal{D})))) = 1/4 \times (|\frac{1330-1160}{1160}| + |\frac{1330-1500}{1500}| + |\frac{2395-1730}{1730}| + |\frac{2395-3060}{3060}|) = 0.215$

<i>Âge</i>	<i>Salaire</i>
[30;39]	1330K
[20;29]	2395K

TABLE 4. Résultats sur données anonymes : Q'_1

Il est entendu que l'objectif de la publication d'une base de données est d'effectuer des analyses de données la concernant. Il s'agit donc pour le responsable de l'anonymisation de proposer un *compromis acceptable* (et le meilleur possible) entre d'une part la sécurité (anonymat) de la base de données, c'est-à-dire la difficulté de la réidentification, et d'autre part l'utilité (estimée ou calculée) de la base anonymisée.

Approche Pratique

Du cas par cas. Il n'existe malheureusement pas de solution d'anonymisation universelle qui s'appliquerait à tous les types d'applications et de données. Une solution d'anonymisation est souvent le résultat d'un (long) travail d'optimisation entre les garanties en terme de sécurité qu'on souhaite fournir et l'utilité des données. Une solution d'anonymisation doit donc être développée au cas par cas et adaptée aux usages prévus et aux données traitées. Par exemple, des données sensibles, comme des données de santé, nécessiteront probablement des solutions d'anonymisation plus robustes que des données moins sensibles, comme par exemple des données de mobilité dans un musée. Par ailleurs, le type de publication envisagée est aussi important à considérer : des données publiées sur le Web, en libre accès, nécessiteront des garanties plus fortes que des données partagées avec un partenaire industriel avec qui un contrat juridique pourra être éventuellement signé.

Anonymisation et analyse de risques. Il est donc souvent souhaitable de combiner le travail de conception de solution d'anonymisation avec une analyse de risques. Cette tâche consiste à décrire précisément la nature des données utilisées, les traitements mis en œuvre, les différents acteurs, en considérant tant les aspects techniques qu'opérationnels. Il conviendra ensuite d'évaluer les risques sur la sécurité des données (confidentialité, intégrité et disponibilité) ainsi que leurs impacts potentiels sur la vie privée. Ce travail d'analyse permettra de développer la solution la mieux adaptée aux besoins et aux contraintes existants [10].

Évaluation. Afin d'évaluer les solutions d'anonymisation, le G29 (le groupement des autorités de protection des données européennes) propose trois critères : l'individualisation, la corrélation et l'inférence [10]. Ainsi, pour « démontrer » qu'une solution est correcte et conforme au RGPD, il faut démontrer que les données anonymisées ne permettent plus d'isoler les données qui appartiennent à un individu, ne permettent plus de relier entre eux des ensembles de données distincts concernant un même individu et ne permettent pas non plus de déduire de l'information sur un

individu. Dans le cas où un des trois critères n'est pas respecté, le G29 stipule que les données ne pourront être considérées comme anonymisées uniquement si une analyse détaillée démontre que les risques de réidentification sont maîtrisés ! Par ailleurs, étant donné que les techniques de réidentification s'améliorent, il est indispensable de réévaluer régulièrement le caractère anonyme des données produites.

La pseudonymisation

Une erreur courante consiste à considérer la pseudonymisation comme une solution d'anonymisation. La pseudonymisation est une technique simple qui consiste à remplacer la valeur d'un attribut « identifiant » (par exemple un nom) par une autre valeur, un « pseudo » (comme le cas de l'exemple 1). Ce « pseudo » peut être généré indépendamment de la valeur d'origine ou en être dérivé (par exemple, en appliquant une fonction de hachage). Clairement, la pseudonymisation permet de réduire le risque de mise en corrélation d'un ensemble de données avec l'identité originale d'un sujet, mais une réidentification indirecte est possible en utilisant, par exemple, les autres attributs [14]. Par conséquent, il est important de rappeler que la pseudonymisation est une mesure de sécurité utile, et qu'il faut encourager, mais ne constitue pas une solution d'anonymisation à part entière.

Techniques d'anonymisation

L'anonymisation moderne : naissance du k-anonymat

On peut dater la problématique moderne de l'anonymisation de la fin des années 1990 avec la publication par Sweeney de plusieurs articles où elle propose le concept de *k-anonymat* (*k-anonymity*), dont nous citons le plus connu [32] publié en 2002. En effet, à l'époque, lorsqu'on parlait d'anonymisation, on faisait référence au concept désormais connu sous le nom de *pseudonymisation*. Comme indiqué précédemment, la pseudonymisation est le remplacement de toutes les données directement identifiantes (comme le numéro de sécurité sociale) par une valeur aléatoire (pseudonyme). Sweeney a montré dans [32] qu'il était possible de réidentifier une base de données relationnelle pseudonymisée (SQL ou plus généralement un fichier tabulaire) en utilisant ses *quasi-identifiants*.

Définition 16 (Quasi-identifiant – QID). Soit $T(A_1, \dots, A_n)$ une table composée de n attributs A_i . On appelle quasi-identifiant Q de T un ensemble d'attributs $Q = \{A_i, \dots, A_j\} \subseteq \{A_1, \dots, A_n\}$ dont la publication doit être contrôlée de manière suivante : Pour être un quasi-identifiant, Q doit être tel que

```
SELECT Ai,...,Aj
  FROM T
 GROUP BY Ai,...,Aj
 HAVING COUNT = 1
```

retourne un résultat non vide. Étant donné un ensemble de $(j - i + 1)$ attributs (e.g. DateNaissance, CP, Sexe), il existe dans l'instance de la table au moins une ligne qui ne partage pas ses valeurs avec une autre ligne de la table (e.g. le triplet *(DateNaissance : 28/2/1980, CP : 18000, Sexe : F)* n'apparaît qu'une seule fois).

On pourra noter, en terme de conception de base de données, que si Q est une clé alors Q est un QID mais pas forcément l'inverse. Si Q était une clé alors la requête précédente donnerait très exactement la projection de T sur Q .

On peut décider, indépendamment de toute connaissance annexe, que Q est un QID, puisqu'il s'agit d'une propriété de l'instance de la table. Par contre, le risque de réidentification est différent et dépend de la connaissance annexe de l'attaquant : si on identifie un QID mais qu'on est *sûr* que l'attaquant ne possède aucune base avec ce même QID, on pourra estimer que le risque de réidentification via ce QID est faible. À l'inverse, identifier un QID sur une table contenant des données sensibles, ainsi qu'une base de données annexe contenant ce même QID et des données identifiantes présente un risque réel.

Exemple 8 (QID des footballeurs). *On peut considérer que le couple (âge, club) forme un quasi-identifiant pour la table 1. Ainsi, Thiago Silva est le seul joueur du PSG à être âgé de 35 ans. Mbappé est le seul joueur du PSG à être âgé de 20 ans. Toutefois il y a plusieurs joueurs âgés de 27 ans (Neymar, Kurzawa, Sarabia).*

Rappelons que la logique de la définition repose sur le fait qu'il est possible de retrouver dans une *autre* base de données à la fois Q mais aussi un attribut (ou un ensemble d'attributs comme le couple nom/prénom) identifiant. Notons que si Q_1 est un quasi-identifiant et $Q_1 \subseteq Q_2$, alors Q_2 est un quasi-identifiant. Lors de l'étude des quasi-identifiants, il convient donc de s'intéresser au(x) quasi-identifiant(s) minimal(aux) par rapport à l'inclusion.

Sweeney définit alors le critère de k -anonymat, et propose une garantie de sécurité par rapport à la réidentification.

Définition 17 (k -anonymat). La publication d'une version anonyme $P_{\mathcal{D}}$ d'une base de données \mathcal{D} respecte le critère de k -anonymat par rapport à un quasi-identifiant Q si et seulement si chaque valeur de $q \in Q$ dans $P_{\mathcal{D}}$ apparaît au moins k fois. On parle alors de *classe d'équivalence* pour tous les n-uplets qui ont la même valeur q .

Exemple 9 (2-anonymat des footballeurs). *La table 5 est 2-anonyme par rapport au QID (âge, club). On voit toutefois qu'on a été obligé de modifier le domaine de définition de l'attribut âge de l'année à la décennie.*

Le k -anonymat peut être vu comme une *contrainte* que doit respecter une version publiée du jeu de données. Plusieurs algorithmes permettant de respecter une telle contrainte existent : des algorithmes basés sur de la suppression (effacement de la valeur d'un attribut ou effacement d'un n-uplet), des algorithmes basés sur de

<i>Âge</i>	<i>Club</i>	<i>Salaire</i>
[30;39]	PSG	1160K
[30;39]	PSG	1500K
[20;29]	PSG	1730K
[20;29]	PSG	3060K

TABLE 5. Données 2-anonymes

la généralisation (modification de la valeur d'un attribut pour le généraliser, tout en conservant la même signification, par exemple généralisation de la commune vers le département ou la région), ou des algorithmes combinant ces deux techniques, comme le préconise Sweeney dans [32]. Une fois qu'on a procédé à cette transformation pour respecter la contrainte sur les quasi-identifiants, on peut publier les données, en leur associant les autres informations (considérées comme des données sensibles).

Optimalité des algorithmes. L'une des questions débattues au sein de la communauté était celle de *l'optimalité* d'une telle anonymisation, c'est-à-dire une transformation qui ferait perdre le moins d'informations, tout en respectant la contrainte [27]. Meyerson et Williams ont montré que trouver la valeur optimale est difficile (NP-difficile), même s'il existe des $O(k \log k)$ -approximations calculables en temps polynomial.

Risque de réidentification. La protection *revendiquée* par une base de données anonymisée selon la contrainte de k -anonymat est que chaque n -uplet étant confondu avec $k - 1$ autres, la probabilité de retrouver le n -uplet correct si on connaît les valeurs exactes du quasi-identifiant est de $1/k$. Il est important de souligner que la garantie proposée, comme toutes les garanties en anonymisation, est une garantie *probabiliste*. Il convient donc au responsable de traitement mettant en œuvre l'anonymisation de décider du risque de réidentification qu'il est prêt à accepter, et de choisir le paramètre de k en conséquence.

Faiblesse du modèle du k -anonymat

L'intérêt principal du k -anonymat est qu'il est facile à comprendre. Les algorithmes permettant de l'implémenter sont également assez rapides (il ne faut guère plus de quelques secondes pour anonymiser une base de données de plusieurs dizaines ou centaines de milliers de lignes). Toutefois, le modèle n'est pas robuste par rapport aux *attaques d'homogénéité*, comme proposées par Machanavajjhala *et al.* [26]. Une telle attaque a lieu lorsque les valeurs sensibles associées à une valeur donnée de quasi-identifiant sont toutes identiques. Dans ce cas, on peut déduire que toutes les personnes ayant cette valeur de quasi-identifiant ont la même donnée sensible, qu'on est capable de déduire.

<i>Âge</i>	<i>Club</i>	<i>Salaire</i>
[30;39]	PSG	1160K
[30;39]	PSG	1500K
[20;29]	PSG	1730K
[20;29]	PSG	3060K
[32]	OM	500K
[32]	OM	500K

TABLE 6. Données 2-anonymes avec un risque de réidentification

Il est donc impossible de donner *a priori* une garantie sur le risque de réidentification, ce qui fait qu'une utilisation du k -anonymat seul ne présente pas de garanties d'anonymat raisonnables.

Exemple 10 (Les footballeurs marseillais). *Considérons la base de données contenant des joueurs d'autres clubs, construite à partir de l'intégralité de la table 1, et présentée de manière 2-anonyme dans la table 6. Si on sait que seuls les joueurs Payet et Gustavo ont 32 ans et jouent à Marseille, on sera capable de déduire que leur salaire est de 500, puisqu'ils ont tous les deux le même salaire.*

Extensions du modèle du k -anonymat

De multiples modèles ont été proposés afin de se prémunir contre les attaques d'homogénéité, en particulier la ℓ -diversité [26] (ℓ -diversity), la t -proximité [25] (t -closeness), la δ -divulgation [11] (δ -disclosure), la β -ressemblance [12] (β -likeness). Tous ces modèles rajoutent des contraintes sur les valeurs sensibles des classes d'équivalence. Considérons la plus simple, la ℓ -diversité.

Définition 18 (ℓ -diversité). Une classe d'équivalence respecte la contrainte de ℓ -diversité si elle contient au moins ℓ valeurs « représentatives » pour la donnée sensible. Une base de données (ou table) est dite ℓ -diverse si toutes ses classes d'équivalence respectent la contrainte de ℓ -diversité.

Exemple 11 (ℓ -diversité des footballeurs). *La table 5 est 2-anonyme et 2-diverse, car chaque classe d'équivalence est composée d'au moins deux n-uplets et chaque classe d'équivalence est associée à au moins deux valeurs sensibles différentes. À noter qu'il y a ici deux classes d'équivalence : ([30;39], PSG) et ([20;29], PSG).*

La table 6 est certes 2-anonyme, mais n'est que 1-diverse puisque pour la classe d'équivalence ([32], OM), il n'y a qu'une seule valeur sensible : 500K.

Il est ensuite possible de discuter de ce que signifie précisément « représentatives » ou combien de fois ces valeurs représentatives doivent apparaître dans une classe d'équivalence pour que le critère de ℓ -diversité soit atteint. Si on comprend

bien l'objectif que cherche à remplir ce modèle, il faut prendre garde à traiter les données sensibles en prenant en compte leur sémantique (d'où la question de données « représentatives »). En effet, il ne s'agit pas seulement d'avoir ℓ valeurs sensibles *yntaxiquement* différentes, encore faut-il qu'on ne puisse pas déduire des informations sensibles concernant les utilisateurs, comme par exemple que tous les utilisateurs d'une classe d'équivalence sont tous atteints d'une pathologie grave ou chronique.

Définition 19 (t -proximité). Une classe d'équivalence respecte la contrainte de t -proximité si la distance entre la distribution de chaque attribut sensible de cette classe et la distribution de chaque attribut sensible de la table complète ne dépasse pas un seuil t . Une base de données (ou table) respecte la contrainte de t -proximité si toutes ses classes d'équivalence respectent la contrainte de t -proximité.

Exemple 12 (t -proximité). *Le développement d'un exemple de t -proximité étant un peu long, nous référerons le lecteur à l'article de Li et al. [25] pour un exemple sur des données médicales.*

La t -proximité précise la définition de « représentativité » des valeurs, en obligeant la distribution des données sensibles de chaque classe d'équivalence à ressembler, à un facteur t près, à la distribution générale de cette même donnée sensible. Commence à se poser alors la question de l'utilité des données. Sous contrainte de t -proximité, les données ne paraissent pas forcément directement exploitables. Toutefois, il reste possible de dégager des tendances, ou d'effectuer des calculs généraux ou corrélations sur l'ensemble de la table.

Il peut être délicat de savoir comment paramétrier la valeur du t de ce modèle. C'est l'objectif du modèle de δ -divulgation : quantifier le gain d'information d'un attaquant qui observe les classes d'équivalence, et qui connaît aussi la distribution des valeurs sensibles.

Définition 20 (δ -divulgation). Soit une valeur sensible v_i avec une fréquence p_i dans la base de données originale, et une fréquence $q_{i,j}$ de cette valeur dans une classe d'équivalence Ec_j . La classe d'équivalence Ec_j est dite δ -divulgation-privée si et seulement si $\forall v_i, |\log(q_{i,j}/p_i)| < \delta$.

Exemple 13 (Les limites de la δ -divulgation). *Malheureusement, si p_i est grand et même pour un δ petit, il n'y a pas de borne maximale réelle sur $q_{i,j}$. Par exemple, on peut choisir $p_i = 0.5$ et $q_{i,j} = 1$ et $\delta = 0.5$ et on aura bien $\log(1/0.5) = \log(2) = 0.3$, or si $q_{i,j} = 1$, cela signifie qu'on connaît avec certitude la valeur de la donnée sensible.*

D'autres modèles existent permettant, par exemple, de mesurer certains critères comme la probabilité d'appartenance d'un individu au jeu de données échantillonné par rapport à un ensemble de personnes. C'est le cas de la δ -présence [29] (δ -presence).

Publications successives

La publication successive d'un jeu de données (par exemple la liste des malades d'un hôpital tous les mois) donne lieu à un problème difficile d'anonymisation. En effet, la publication de deux jeux de données peut donner lieu à une attaque par *différence*, qui consiste à faire la différence entre les deux jeux de données. Si l'attaquant connaît les individus qui sont arrivés ou sont partis de l'hôpital entre-temps, il sera capable de remonter à l'ensemble de leurs données sensibles. Certains modèles comme la *m*-invariance [34] ont été proposés, mais leur utilité est assez réduite, puisque les publications multiples accumulent des données qui ont déjà été publiées, afin de se protéger. La meilleure manière de faire des publications multiples sera d'utiliser la technique de confidentialité différentielle que nous détaillons dans la suite.

Differential Privacy⁶

Intérêt et définition

La DP, introduite par Dwork [17, 18], n'est pas un modèle d'anonymisation, mais la caractéristique d'une opération (ou exécution d'un algorithme) sur des données qui présentent certaines garanties de confidentialité. Il est donc tout à fait possible d'avoir des algorithmes cherchant à atteindre un modèle spécifique d'anonymat, tout en proposant des garanties de DP. Par exemple, Domingo-Ferrer et Soria-Comas montrent qu'il est possible d'atteindre des garanties de DP avec le modèle de la *t-closeness* [16].

La DP est très en vogue, car elle permet de quantifier un risque de réidentification «absolu». Toutefois, le paramétrage de ce risque de réidentification n'est pas simple, en particulier lorsque l'ensemble des données sensibles est grand. En effet, la DP fonctionne au mieux lorsqu'il n'y a qu'un faible nombre de valeurs pour les données sensibles (par exemple vrai/faux, masculin/féminin...).

Considérons un algorithme *ALG* et deux bases de données \mathcal{D}_1 et \mathcal{D}_2 , telles que $\mathcal{D}_1 = \mathcal{D}_2 \cup d$ et $d \notin \mathcal{D}_2$. La garantie que cherche à fournir la DP est qu'en observant $\Omega = ALG(\mathcal{D})$, le résultat de l'exécution de *ALG* sur un jeu de données \mathcal{D} , il sera très difficile de savoir si $\mathcal{D} = \mathcal{D}_1$ ou $\mathcal{D} = \mathcal{D}_2$. Dit autrement, Ω ne doit pas changer beaucoup, selon que d est présent ou absent de la base de données utilisée en entrée de *ALG*. Un seul individu ne doit donc pas foncièrement changer la valeur de l'exécution de *ALG*.

6. Nous utilisons ici le terme anglais, ou son abréviation *DP*. La traduction française communément admise est *confidentialité différentielle*.

Définition 21 (ϵ, δ -differential privacy). Soient $\epsilon \in \mathbb{R}^+$ et $\delta \in \mathbb{R}^{*+}$. On dit qu'un mécanisme ALG respecte la contrainte de ϵ, δ -differential privacy si et seulement si $Pr[ALG(\mathcal{D}_1) = \Omega] \leq \exp(\epsilon) \times Pr[ALG(\mathcal{D}_2) = \Omega] + \delta$. Si $\delta = 0$, on parle alors simplement d' ϵ -differential privacy.

Note : $Pr[ALG(\mathcal{D}_1) = \Omega]$ signifie « la probabilité d'observer Ω comme résultat de l'exécution de ALG sur la base de données \mathcal{D}_1 ».

Il découle de la définition de la DP que l'algorithme ALG doit être un algorithme *probabiliste et non déterministe*, c'est-à-dire que plusieurs exécutions successives de l'algorithme sur la même entrée peuvent produire des résultats différents. En effet, si ALG était déterministe, on ne pourrait pas choisir ϵ aussi petit qu'on veut.

Il est également très important de souligner que les garanties de DP s'appliquent également à tous les *post-traitements*. C'est-à-dire que tous les algorithmes d'analyse de données exécutés sur une base de données qui est passée par un processus de ϵ -differential privacy produiront des résultats ayant cette même garantie, avec le même ϵ .

La DP en pratique

La garantie proposée par la DP est que la probabilité d'observer une valeur plutôt qu'une autre ne doit pas être sensiblement différente (i.e. à $\exp(\epsilon)$ près) selon qu'un individu est présent ou pas. Nous allons voir comment cela peut être appliqué en pratique.

Exemple 14 (Un exemple d'algorithme DP : la réponse aléatoire à un sondage). *Considérons l'algorithme classique de réponse aléatoire à un sondage (ou randomized response, RR). Son objectif est de protéger les réponses des individus à une question de type vrai/faux selon le processus suivant :*

(1) *La personne lance (secrètement) une pièce de monnaie, si elle tombe sur face, elle donne la vraie réponse. (On considère ici une probabilité égale pile/face).*

(2) *Si la pièce de monnaie tombe sur pile, alors la personne relance une pièce. Si cette fois c'est face, elle répond vrai, si c'est pile, elle répond faux.*

Une rapide analyse montre que si une personne a répondu vrai à la question, alors la probabilité que ce soit la vérité est de 0.75, alors que la probabilité qu'en vérité ce soit faux est de 0.25. Si ce qui nous intéresse est la proportion totale dans un ensemble de personnes de vrai/faux alors on voit qu'on est en mesure d'estimer cette valeur par rapport aux réponses observées : si x est le nombre de personnes ayant la propriété vrai, x_O le nombre de personnes observées ayant répondu vrai et n le nombre total de personnes, alors on est capable d'estimer $x \approx x_{est} = 2 \times x_O - n/2$.

Par rapport au ϵ , il faut comparer les valeurs possibles d'espérance et de variance pour les jeux de données contenant un individu particulier, et un jeu de données ne le

comprenant pas. Considérons l'objectif qui est de calculer la fonction x_{est} , que l'on atteint en mesurant x_O . Toutes choses étant égales par ailleurs, la réalisation de x_O pour une base de données de \mathcal{D}_1 contenant un individu ayant la caractéristique `vrai` et un jeu de données \mathcal{D}_2 où il n'est pas présent est supérieure dans 75 % des cas et identique dans 25 % des cas. Ainsi, avec les paramètres de notre exemple, on aura trois fois plus de chances de tomber juste en choisissant `vrai` si la réalisation de l'algorithme est supérieure à l'espérance. En d'autres termes, $\epsilon = \ln(3) \approx 1.09$.

Réciproquement, on peut aussi calculer la probabilité P qu'il faut appliquer au premier jet avant de relancer pour un ϵ donné. On pourrait montrer que pour des valeurs de ϵ très proches de 0, il faut choisir $P = 2\epsilon$.

Évaluer la protection statistique à partir de ϵ

Il est intéressant de noter, par rapport à cet exemple, que nous avons discuté de la valeur de ϵ mais que ce qui nous intéresse véritablement est le risque de retrouver la valeur de la donnée sensible, soit ici la valeur $P = 0.75$. P peut se calculer à partir de ϵ , sachant que dans notre exemple $P + \bar{P} = 1$ et $P = \exp(\epsilon) \times \bar{P}$, soit $P = 3 \times (1 - P) = 0.75$.

D'une manière plus générale, il est également possible de remonter à cette probabilité dans le cas où le nombre de valeurs de la donnée sensible est fini, et vaut n .

Théorème 22 (Probabilité de réidentification). *Soit n valeurs pour une donnée sensible, et soit x_O une observation d'un algorithme respectant la contrainte de DP avec une valeur ϵ . La probabilité de pouvoir déduire la valeur de la donnée sensible à partir de cette observation est de $P \leq \frac{\exp(\epsilon)}{\exp(\epsilon) + n - 1}$*

Démonstration. Soit P_1 la probabilité de retrouver la valeur correcte. Soient P_2, \dots, P_n les autres probabilités. On a $\sum_{i \in [1; n]} P_i = 1$ et $\forall j > 1, P_1 \leq \exp(\epsilon) \times P_j$. Si on considère que $\forall j > 1, k > 1, P_j = P_k$ alors on a $P_1 \leq \frac{\exp(\epsilon)}{\exp(\epsilon) + n - 1}$. \square

On voit que dans le cas $n = 2$ et $\epsilon = \log(3)$ on retrouve bien $P_1 \leq 3/4$. On voit aussi, que pour des jeux de données où il y a un grand nombre de valeurs de données sensibles, un ϵ de l'ordre de 10 peut fournir une bonne protection. Par exemple si on a $n = 10^6$ et $\epsilon = 10$ alors $P \approx 0.0216$.

Théorème de composition

La DP permet de résoudre le problème de la publication successive.

Théorème 23 (Composition de la DP). *Un processus $ALG'(\mathcal{D})$ composé de l'exécution successive de k fois le même processus sur le même jeu de données $ALG(\mathcal{D})$ respectant la contrainte d' ϵ -DP respectera une contrainte de $(k \times \epsilon)$ -DP.*

Note : si les processus sont exécutés sur des jeux de données indépendants, alors on prend simplement la valeur maximale des ϵ mis en jeu.

Exemple 15 (Réponses aléatoires multiples à un sondage). *Reprenons l'exemple précédent, et appliquons exactement le même processus aléatoire, mais deux fois de suite. Supposons que la réponse véritable soit vrai. Nous répondons donc la vérité la première fois avec une probabilité 0.75 et de même la seconde fois. La valeur de ϵ devient donc $2\log(3)$. On comprend assez naturellement que ϵ augmente à chaque fois qu'on observe de nouveau le résultat de l'algorithme, et en effet, si on exécute l'algorithme un grand nombre de fois, il paraît assez naturel de penser que la valeur apparaissant le plus fréquemment sera la réponse véritable de l'individu.*

Grâce à la DP, on est donc en mesure de quantifier très exactement le coût (en termes d'augmentation du ϵ global) de la publication d'une donnée. Toutefois, le théorème de composition de la DP ne doit pas faire croire qu'il est possible de publier à l'infini des données en respectant des garanties fortes. Il est donc possible d'exploiter le théorème de deux manières :

- (1) On se donne à l'avance un certain « budget » (sous la forme d'un ϵ), et on s'autorise k publications. Dans ce cas, chaque publication p_i devra utiliser un $\epsilon_i = \epsilon/k$.
- (2) On effectue k publications avec divers ϵ_i . Alors, au final, on peut estimer le « risque » encouru $\epsilon = \sum_i \epsilon_i$.

Quelques exemples d'utilisation de la DP

Suite à des attaques sur son recensement de 2000 [15], le bureau du recensement américain expérimente depuis 2018 l'utilisation de garanties de DP qu'elle souhaite mettre en œuvre pour son recensement de 2020 [5]. L'un de ses problèmes principaux est de bien régler le compromis entre protection et utilité des données.

En 2016, Google a proposé un framework nommé RAPPOR [20] pour récupérer des données des utilisateurs (afin d'effectuer des calculs de statistiques) avec des garanties de DP. La valeur choisie dans ce cas de figure était de $\ln(3)$, avec une approche inspirée de l'algorithme de *réponse aléatoire*.

Apple a également été l'un des précurseurs à utiliser la DP dans ses algorithmes d'apprentissage sur les données des utilisateurs des iPhones [33]. Ils ont appliqué leurs algorithmes d'IA au calcul des emojis les plus fréquents par langue, aux profils de consommation énergétiques de leur navigateur, ou encore à la découverte de nouveaux mots (comme des noms propres) pour le correcteur orthographique. Dans ce cas de figure, les valeurs de ϵ utilisées sont entre 2 et 8, pour une utilité d'apprentissage donnée.

Enfin, on pourra mettre en garde contre les approches qui cherchent à maximiser l'utilité, sans toutefois utiliser la DP, mais qui peuvent néanmoins être jugées conformes par rapport à la législation, comme Diffix [21], et pour lesquelles des attaques de désanonymisation ont été démontrées possibles [23].

Logiciel de mise en œuvre des techniques d'anonymisation

Un outil *open source* développé par l'Université Technologique de Munich, ARX⁷ [31], permet de réaliser des anonymisations selon de nombreux modèles à partir de données originales en format tabulaire. L'outil permet également d'estimer les risques de désanonymisation selon les modèles présentés plus haut, et même de manière plus fine en calculant la distribution des probabilités de désanonymisation et non simplement les valeurs maximales.

Conclusion

Cet article est introductif et ne décrit pas toutes les techniques d'anonymisation qui existent. Une description plus exhaustive peut être trouvée dans [22, 13, 10].

Nous avons essentiellement discuté, dans cet article, la question de l'anonymisation appliquée aux données tabulaires. Il y a de nombreux autres domaines, en particulier le domaine de l'anonymisation des données de géolocalisation, qui ont donné lieu à un grand nombre de publications ces dernières années [14, 28, 8, 7]. Ces données sont, par nature, difficiles à anonymiser car elles sont très identifiantes. En effet, des études ont montré que la connaissance de trois ou quatre points spatiaux-temporels d'une trajectoire suffisait pour réidentifier, avec une probabilité élevée, une personne dans une population de plusieurs millions d'individus [14]. Différents types d'anonymisation ont été proposés dans la littérature. Certaines solutions proposent de publier uniquement des statistiques sur les différentes trajectoires, comme leur longueur moyenne ou les endroits les plus souvent visités. D'autres approches proposent de publier des données synthétiques, c'est-à-dire des trajectoires générées artificiellement à partir des caractéristiques statistiques des vraies trajectoires [9]. Finalement, d'autres solutions proposent de modifier les trajectoires avant de les publier, par exemple, en groupant les trajectoires similaires [8] ou en y ajoutant du bruit [6].

Lors du choix de la technique d'anonymisation à mettre en œuvre, il convient de rappeler que seule la DP permet d'avoir une garantie (probabiliste) indépendante des connaissances des attaquants. Les autres modèles doivent faire des hypothèses sur la connaissance des attaquants, et peuvent donc être parfois contournés si un attaquant dispose d'informations qu'on ne l'imaginait pas avoir (ou qui sont collectées postérieurement à l'anonymisation).

Une question difficile à trancher est la valeur du ϵ pour la DP. Nous constatons, dans les faits, que les entreprises mettant en œuvre la DP optent pour des valeurs autour de $\epsilon = 1$ ou plus, mais il faut bien comprendre que la sécurité liée à cet ϵ dépend aussi du nombre de valeurs différentes possibles parmi lesquelles il faut choisir. Ce n'est pas la même chose d'avoir $\epsilon = 1$ avec deux valeurs (auquel cas

7. ARX est disponible sur <https://arx.deidentifier.org/>

comme on l'a vu avec l'exemple 14 de la réponse aléatoire, une réponse pourra être très fréquente de l'ordre de 75 % de chances d'observer la bonne valeur), et $\epsilon = 1$ avec 1000 valeurs où toutes les probabilités seront de l'ordre de 10^{-3} et avec une valeur légèrement supérieure (3.10^{-3}) pour la bonne valeur. Quoi qu'il en soit, il faut choisir le plus petit ϵ possible permettant de continuer à obtenir des résultats exploitables pour l'algorithme d'analyse de données.

Finalement, il faut rappeler que l'anonymisation ne constitue qu'un élément dans une stratégie globale de gouvernance des données qui doit aussi considérer, par exemple, l'audit des systèmes, la gestion du stockage des données ou la gestion des droits d'accès [30].

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Christine Froideveaux pour sa suggestion de l'écriture de cet article, pour sa relecture attentive et ses commentaires, et Cédric Eichler pour des discussions autour de l'applicabilité de la DP.

Références

- [1] Loi n° 51-711 sur l'obligation, la coordination et le secret en matière de statistiques. *Journal Officiel de la République Française*, 6 juin 1951 :6013, 1951.
- [2] Loi n° 78-17 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés. *Journal Officiel de la République Française*, 6 janvier 1978.
- [3] RÈGLEMENT (UE) 2016/679 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/ce (règlement général sur la protection des données)(texte présentant de l'intérêt pour l'eee). *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 2016/679, 2016.
- [4] Traité sur l'union européenne et du traité sur le fonctionnement de l'union européenne. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 2016/C 202/01, 2016.
- [5] John M. Abowd. The U.S. census bureau adopts differential privacy. In *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, KDD 2018, London, UK, August 19-23, 2018*, page 2867, 2018.
- [6] Osman Abul, Francesco Bonchi, and Mirco Nanni. Never walk alone : Uncertainty for anonymity in moving objects databases. In *Proceedings of the 24th International Conference on Data Engineering, ICDE 2008, April 7-12, 2008, Cancún, Mexico*, pages 376–385, 2008.
- [7] G. Acs, G. Biczok, and C. Castelluccia. *Privacy-Preserving Release of Spatio-Temporal Density*. Handbook of Mobile Data Privacy, ISBN : 978-3-319-98161-1, Springer, 2018.
- [8] Gergely Acs and Claude Castelluccia. A Case Study : Privacy Preserving Release of Spatio-temporal Density in Paris. In *KDD '14 Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, August 2014.
- [9] Gergely Ács, Luca Melis, Claude Castelluccia, and Emiliano De Cristofaro. Differentially private mixture of generative neural networks. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 31(6) :1109–1121, 2019.

- [10] Article 29 Data Protection Working Party. Avis 05/2014 sur les techniques d'anonymisation, April 2014.
- [11] Justin Brickell and Vitaly Shmatikov. The cost of privacy : Destruction of data-mining utility in anonymized data publishing. In *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '08, pages 70–78, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [12] Jianneng Cao and Panagiotis Karras. Publishing microdata with a robust privacy guarantee. *Proc. VLDB Endow.*, 5(11) :1388–1399, July 2012.
- [13] Bee-Chung Chen, Daniel Kifer, Kristen LeFevre, and Ashwin Machanavajjhala. Privacy-preserving data publishing. *Foundations and Trends in Databases*, 2(1-2) :1–167, 2009.
- [14] Yves-Alexandre de Montjoye, Cesar A. Hidalgo, Michel Verleysen, and Vincent D. Blondel. Unique in the crowd : The privacy bounds of human mobility. *Scientific Reports, Nature*, March 2013.
- [15] Irit Dinur and Kobbi Nissim. Revealing information while preserving privacy. In *Proceedings of the Twenty-Second ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, June 9-12, 2003, San Diego, CA, USA*, pages 202–210, 2003.
- [16] Josep Domingo-Ferrer and Jordi Soria-Comas. From t-closeness to differential privacy and vice versa in data anonymization. *Knowl.-Based Syst.*, 74 :151–158, 2015.
- [17] Cynthia Dwork. Differential privacy. In *Automata, Languages and Programming, 33rd International Colloquium, ICALP 2006, Venice, Italy, July 10-14, 2006, Proceedings, Part II*, pages 1–12, 2006.
- [18] Cynthia Dwork and Aaron Roth. The algorithmic foundations of differential privacy. *Foundations and Trends in Theoretical Computer Science*, 9(3-4) :211–407, 2014.
- [19] Khaled El Emam and Fida Kamal Dankar. Research paper : Protecting privacy using k-anonymity. *JAMIA*, 15(5) :627–637, 2008.
- [20] Giulia C. Fanti, Vasyl Pihur, and Úlfar Erlingsson. Building a RAPPOR with the unknown : Privacy-preserving learning of associations and data dictionaries. *PoPETs*, 2016(3) :41–61, 2016.
- [21] Paul Francis, Sebastian Probst Eide, and Reinhard Munz. Diffix : High-utility database anonymization. In *Privacy Technologies and Policy - 5th Annual Privacy Forum, APF 2017, Vienna, Austria, June 7-8, 2017, Revised Selected Papers*, pages 141–158, 2017.
- [22] Benjamin C. M. Fung, Ke Wang, Rui Chen, and Philip S. Yu. Privacy-preserving data publishing : A survey of recent developments. *ACM Comput. Surv.*, 42(4) :14 :1–14 :53, June 2010.
- [23] Andrea Gadotti, Florimond Houssiau, Luc Rocher, Benjamin Livshits, and Yves-Alexandre de Montjoye. When the signal is in the noise : Exploiting diffix's sticky noise. In *28th USENIX Security Symposium, USENIX Security 2019, Santa Clara, CA, USA, August 14-16, 2019.*, pages 1081–1098, 2019.
- [24] INSEE. Guide du secret statistique, 2018.
- [25] Ninghui Li, Tiansheng Li, and Suresh Venkatasubramanian. t-closeness : Privacy beyond k-anonymity and l-diversity. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Data Engineering, ICDE 2007, The Marmara Hotel, Istanbul, Turkey, April 15-20, 2007*, pages 106–115, 2007.
- [26] Ashwin Machanavajjhala, Daniel Kifer, Johannes Gehrke, and Muthuramakrishnan Venkitasubramaniam. L-diversity : Privacy beyond k-anonymity. *TKDD*, 1(1) :3, 2007.
- [27] Adam Meyerson and Ryan Williams. On the complexity of optimal k-anonymity. In *Proceedings of the Twenty-third ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, PODS '04*, pages 223–228, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [28] Darakhshan J. Mir, Sibren Isaacman, Ramón Cáceres, Margaret Martonosi, and Rebecca N. Wright. Dp-where : Differentially private modeling of human mobility. In *BigData Conference*, pages 580–588, 2013.

- [29] Mehmet Ercan Nergiz, Maurizio Atzori, and Chris Clifton. Hiding the presence of individuals from shared databases. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, SIGMOD '07, pages 665–676, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [30] Institute of Medicine. *Sharing Clinical Trial Data : Maximizing Benefits, Minimizing Risk*. The National Academies Press, Washington, DC, 2015.
- [31] Fabian Prasser and Florian Kohlmayer. Putting statistical disclosure control into practice : The ARX data anonymization tool. In *Medical Data Privacy Handbook*, pages 111–148. 2015.
- [32] Latanya Sweeney. Achieving k-anonymity privacy protection using generalization and suppression. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 10(5) :571–588, 2002.
- [33] Differential Privacy Team. Learning with privacy at scale. 1(8), 2017.
- [34] Xiaokui Xiao and Yufei Tao. M-invariance : Towards privacy preserving re-publication of dynamic datasets. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, SIGMOD '07, pages 689–700, New York, NY, USA, 2007. ACM.

DOSSIER : ACCESSIBILITÉ ET INFORMATIQUE



Introduction à l'accessibilité

T. Fraysse¹

Le polyhandicap se définit comme un handicap grave à expressions multiples associant toujours une déficience motrice et une déficience intellectuelle sévère ou profonde, entraînant une restriction extrême de l'autonomie et des possibilités de perception, d'expression et de relation. L'EEAP Coste Rousse accueille des enfants en situation de polyhandicap depuis 1990 et a vu l'évolution des techniques d'accompagnement et d'aides permettant de pallier dans la mesure du possible le handicap.

L'évolution des outils numériques a permis à ces enfants et adolescents d'interagir avec le média informatique et ainsi démontrer des compétences insoupçonnées ou inexploitables auparavant. Le premier article de Philippe Truillet présente un certain nombre de ces outils développés à l'IRIT. L'utilisation de contacteurs a été un premier pas mais demande une capacité oculo-manielle complexe. De plus, les régressions motrices font que progressivement cette compétence tend à disparaître.

La démocratisation du tactile a aussi été une évolution pour les personnes pouvant pointer du doigt, ce qui est loin de représenter une majorité des jeunes que nous accueillons. Par contre, l'apparition du système d'oculométrie est une véritable révolution dans le monde du handicap dans le sens où l'orientation du regard est performante et préservée dans le cas de nombreuses pathologies dont le syndrome de Rett. Partant de ce constat, le projet GazePlay (deuxième article) propose un logiciel libre et gratuit qui rassemble plusieurs mini-jeux compatibles contrôlés par un oculomètre. Cet outil permet aux enfants en situation de polyhandicap d'accéder à l'apprentissage de la communication par le biais de synthèses vocales mais aussi, et on l'oublie trop souvent, de pouvoir s'occuper seul et jouer comme n'importe quel enfant. Ceci permet aussi un changement de regard sur le handicap. Ces enfants ne

1. Établissement pour enfants et adolescents polyhandicapés (EEAP) Coste Rousse.

sont plus définis par leurs incapacités. Au contraire, ils nous surprennent au quotidien par leurs compétences.

Beaucoup de projets sont encore à développer, particulièrement pour les apprentissages nécessaires à l'inclusion dans le milieu scolaire. Nous avons bon espoir qu'un *escape game* comme E-LearningScape Access (troisième article) ou qu'un simulateur de conduite de fauteuil roulant (quatrième article) favorisent cet objectif et travaillons en ce sens avec des personnes impliquées comme M. Schwab et M^{me} Rodriguez que nous remercions au nom de ces enfants et de leurs familles.

DOSSIER : ACCESSIBILITÉ ET INFORMATIQUE



L'informatique, pour un monde plus accessible

Philippe Truillet¹

Introduction

Dans les sociétés modernes, l'information et la communication inter-individuelles ont pris une grande importance et leur accès et partage par et pour tous représentent un enjeu de société considérable. Ne pas prendre en compte les besoins et les spécificités des personnes les plus fragiles (handicapés, personnes âgées...) revient à les exclure en leur fermant l'accès à l'éducation, au marché du travail, à la culture et à tout ce qui fait le ciment de nos sociétés. Il est à noter que dans de très nombreux pays, des lois ont été votées pour obliger les contributeurs d'information à proposer des solutions accessibles à tous. En France, la loi 2005-102 du 11 février 2005² « *pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées* » affirme dans son titre IV l'obligation pour les pouvoirs publics de rendre accessibles les services de communication « *quels que soient le moyen d'accès, les contenus et le mode de consultation* ».

L'informatique joue bien évidemment un rôle clé dans l'inclusion des personnes à besoin spécifique. Elle permet notamment l'accès à l'information au travers d'outils dédiés (synthèse vocale, plages braille, périphériques spécifiques, etc.). Néanmoins, malgré la résolution de l'Assemblée générale des Nations unies³, dont l'objectif

1. Université Toulouse 3, IRIT, UPSSITECH

2. <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000809647>

3. *UN General Assembly, Convention on the Rights of Persons with Disabilities : resolution adopted by the General Assembly*, 24 January 2007, A/RES/61/106, <http://www.refworld.org/docid/45f973632.html>

est de « permettre aux personnes handicapées de vivre de façon indépendante et de participer pleinement à tous les aspects de la vie » (cf. article 9), il reste des situations pour lesquelles l’accessibilité reste délicate. Permettre un accès au poste de travail informatique pour tous n’est possible qu’en prenant en compte plusieurs paramètres : l’usager dans ce qu’il est, ses capacités perceptives et cognitives, l’environnement dans lequel il vit, les performances technologiques utilisées, etc.

De multiples technologies pour l’autonomie

Il existe sur le marché un très grand nombre d’outils d’assistance (dites aussi *Assistive Technologies*) qui vont de systèmes de lecture d’écrans, de la chaise roulante à des bras robotisés en passant par les contacteurs *on-off, joysticks*, etc.

Ces aides ont des caractéristiques évidemment différentes suivant le niveau de handicap et/ou de la mobilité de la personne. Par exemple, pour celles qui ont des mouvements involontaires et mal coordonnés, un guide-doigt (grille posée sur un clavier physique) peut être suffisant afin d’éviter les appuis simultanés de plusieurs touches et de permettre de reposer les mains alors qu’une personne qui ne dispose plus d’aucune mobilité ni de ses membres supérieurs, on ne peut proposer que des dispositifs d’interaction comme un système de suivi du regard (*eye-tracker*) ou de suivi de tête (*head-tracker*).

Comme le souligne [Laffont et al., 2008], la possibilité de contrôler son environnement est déterminante pour la qualité de sa réinsertion sociale, familiale et professionnelle. [Verdonck et al., 2009, Pino and Brangier, 2000] définissent en outre cinq thèmes liés à l’usage des technologies : l’autonomie, la liberté, la sécurité, du temps pour soi et les relations avec les autres. Ceci démontre que ces outils doivent surtout être vus comme un droit fondamental de la personne. Malheureusement, on constate que toutes ces aides peuvent être très onéreuses surtout lorsque le handicap est lourd alors qu’elles restent nécessaires pour briser la solitude dans laquelle beaucoup de personnes sont plongées.

D’un point de vue des usages, les résultats d’un questionnaire datant de 2004 [Brochard et al., 2007], montrent que la communication (e-mail, Internet...) constitue le premier usage de l’ordinateur (82,5 %) possédé par 69,5 % des personnes. En outre, l’étude de [Kane et al., 2009] montre que de manière assez surprenante, les utilisateurs optent plutôt pour le choix de technologies répandues même si cela implique quelques difficultés d’usage.

Cependant, le simple fait d’avoir un accès aux technologies n’abolit pas forcément les barrières de l’accessibilité. [Phillips and Zhao, 1993, de Boer et al., 2009] – dans un contexte légèrement différent – soulignent que le taux d’abandon des technologies d’assistance reste important (aux alentours de 30 %) du fait d’utilisateurs

non consultés, de difficultés à obtenir les périphériques, parfois de leur faible performance ou encore du fait de changement des priorités et des besoins. Cette difficulté à comprendre les usages de tous les jours est d'ailleurs souvent reprise dans la littérature.

C'est pour cela qu'il nous semble nécessaire de développer des stratégies et services qui augmentent l'engagement des utilisateurs et de considérer les besoins à long-terme. Il semble que les technologies dites DIY (*Do-It-Yourself*, faîtes-le par vous-même) associées à une démarche de conception centrée sur l'utilisateur sont une solution intéressante pour résoudre ce problème. [Hurst and Tobias, 2011] souligne par exemple que le DIY permet un accès plus aisément à la technologie récente, qu'il réduit les temps de décision et d'implémentation avec des coûts moindres par rapport aux solutions commerciales. De plus, le mouvement DIY permet une émulation de tous les acteurs concernés et de créer des communautés riches et imaginatives.

Une nécessité de concevoir *avec et pour* des personnes à besoin spécifique

[Hurst and Tobias, 2011] fait, de plus, le parallèle entre le mouvement DIY et la théorie de la diffusion de l'information de [Rogers, 1995] concernant l'adoption des technologies. On retrouve peu ou prou ces étapes dans l'approche centrée utilisateur utilisée classiquement en IHM (Interaction Homme-Machine). En effet, cette approche *se focalise sur les besoins de l'utilisateur plutôt que sur la technologie* ce qui permet de réduire a priori les problèmes d'utilisabilité. Beaucoup de travaux ont été menés sur cette méthodologie et il existe un grand nombre de méthodes et d'outils pour la mettre en œuvre. Quelques règles de base pour la mise en œuvre sont définies par la norme ISO 9241-210⁴. Selon cette norme, il est, entre autre, indispensable de réaliser une « *participation active des utilisateurs* » dans les quatre phases du processus de conception : l'analyse des besoins et d'activités des utilisateurs, la production d'idées, la conception et prototypage et l'évaluation par rapport aux exigences. Quelques méthodes utilisables pour la conception sont présentées par [Muller and Kuhn, 1993]. Parmi celles-ci, la conception dite participative met en avant une collaboration tout au long du processus de conception entre différents acteurs : concepteurs, développeurs, décideurs... et les utilisateurs.

Comme nous l'avons vu précédemment, le handicap recouvre un large panel de situations individuelles différentes avec des capacités sensorielles ou actionnelles qui peuvent varier au cours du temps. Cela pose d'emblée au moins deux problèmes : (1) le temps important à consacrer afin de concevoir une aide personnalisée et (2) le travail *artisanal* requis pour répondre au mieux aux problèmes de handicap, ce qui exclut en outre la réutilisabilité du résultat.

4. <https://www.iso.org/fr/standard/52075.html>

Ce sont autant de raisons pour lesquelles nous plaidons, nous aussi, pour une démarche de conception d'aides techniques réellement centrée sur l'utilisateur.

Il y a, de notre point de vue, de nombreux avantages à utiliser cette méthode, particulièrement pour des personnes à besoin spécifique, d'abord parce que de nombreux outils qui leur sont destinés restent peu interopérables, assez rigides et compliqués à utiliser [Kemoun et al., 1997]. Ensuite, il nous semble important de fournir très rapidement des outils d'aide sous forme de prototypes même s'ils ne sont pas complètement fonctionnels parce que cela peut générer un « cercle vertueux » permettant d'affiner à la fois les besoins ou en créer de nouveaux.

L'étape du prototypage et le *do-it yourself*

Le prototypage est une étape essentielle à la fois pour réduire le coût de développement, pour tester l'utilisabilité d'un système ou d'une technologie, mais également pour améliorer la connaissance sur l'attitude, le comportement des utilisateurs et les fonctionnalités du système (en termes de modalités d'interaction utilisées, des stratégies d'utilisation...) [Arnowitz et al., 2006]. De plus, le prototypage permet de tester à moindre frais un certain nombre de solutions innovantes pouvant être utiles aux utilisateurs dans le contexte envisagé. Le retour sur expérience peut alors être employé pour guider les développements ultérieurs.

Dans ce sillage, l'apparition récente de plusieurs plateformes électroniques simples, peu onéreuses, *ouvertes* et programmables comme Arduino⁵ et plus récemment Microbit⁶ a été une véritable révolution. Ces plateformes permettent à tout un chacun de s'approprier les systèmes physiques et utiliser des capteurs ou effecteurs aussi facilement que de piloter son ordinateur.

Tout ceci ouvre donc de nombreuses perspectives dans le cadre du handicap notamment lorsque l'usage de capteurs physiques devient nécessaire pour piloter son ordinateur. En effet, l'adaptation de l'interface au regard des interacteurs adaptés (ensemble des périphériques et techniques d'entrée) et de l'évolution du handicap des patients reste souvent un problème majeur à résoudre.

Des exemples de systèmes développés et d'expérimentation

Depuis plus de vingt ans, notre équipe à l'IRIT⁷ (Institut de recherche en informatique de Toulouse) travaille sur ces domaines de l'accessibilité et la recherche de méthodes et de solutions. Nous allons illustrer ci-après quelques méthodes de conception centrée-utilisateur avec quelques projets développés à l'IRIT et au sein de l'université Toulouse 3 ces dernières années.

5. <http://www.arduino.cc>

6. <https://microbit.org/fr>

7. <https://www.irit.fr>

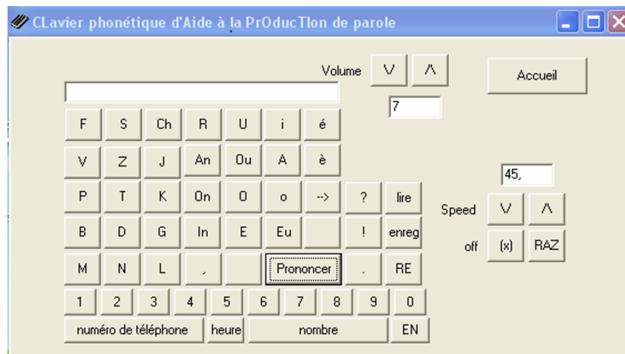


FIGURE 1. Interface logicielle de Clapoti.

Clapoti : un clavier virtuel à entrée phonétique

Ce système a été développé en 2002 sur une durée d'un an pour M. R., personne tétraplégique avec une mobilité faible des bras, mal-voyant et aphasic suite à un accident de la route. Le système Clapoti [Vella et al., 2003] est une aide technique qui permet la communication orale au travers d'un dispositif de synthèse vocale. L'objectif est de permettre une production vocale rapide en utilisant la concaténation de phonèmes (plus petite unité de sons d'une langue). Ainsi, chaque touche du clavier est associée à un caractère phonétique IPA⁸ (*International Phonetic Alphabet*).

Un des besoins exprimés par M. R. était que ce système devait être utilisable pour deux situations d'interaction : en face à face ou le plus souvent à distance au travers d'un téléphone. Clapoti a donc été conçu et développé en utilisant une approche participative. Nous avons débuté par l'analyse fonctionnelle du système existant utilisé par la personne. Cette analyse a mis en exergue certains problèmes cruciaux comme par exemple celui de la saisie des messages au clavier. L'ensemble des résultats a été utilisé pour prototyper une première version de Clapoti (cf. figure 1) développée à l'aide de Mbrola⁹, système libre de synthèse de phonèmes multilingue¹⁰.

Nous avons ensuite utilisé un scénario de travail correspondant à une des activités essentielles du système à savoir la prise de rendez-vous par téléphone à l'aide du système utilisé. L'usage de scénarios en IHM permet de se focaliser d'abord sur les problèmes d'usages et non des problèmes techniques. A l'issue de cette phase,

8. <http://www.phon.ucl.ac.uk/home/wells/ipa-unicode.htm>

9. *Mbrola Project*, Faculté polytechnique de Mons (Belgique), <http://tcts.fpms.ac.be/synthesis/mbrola.html>

10. Pour des applications non commerciales.

nous avons ainsi pu identifier deux problèmes récurrents : (1) la rupture de la communication par l'interlocuteur distant (qui ne comprend pas ce qui se passe – lenteur des messages tapés...) et (2) la mauvaise intelligibilité de la synthèse utilisée (voix de type robotique). Ceci a conduit à deux propositions implémentées : l'ajout d'un message d'accueil en message pré-enregistré par une voix humaine afin d'expliquer la situation (*« vous allez enter en communication avec une personne s'exprimant au travers d'une voix de synthèse... »*) et l'ajout d'un *feedback* sonore reflétant l'activité d'écriture.

Nous avons finalement évalué le prototype fonctionnel autour de deux objectifs : évaluer le type de rétroaction sonore et le message de bienvenue et évaluer le système Clapoti par un questionnaire.

Quinze personnes ont ainsi pris part à l'évaluation. Nous avons réutilisé le scénario conçu comme support à l'évaluation. En terme d'usage, il est apparu que la rétroaction *son phonétique* était intéressante car elle renseigne sur l'activité de l'utilisateur (quelle touche l'utilisateur du clavier saisit à un moment donné). Toutefois, ce retour sonore tend à faire perdre l'attention de l'interlocuteur qui demande souvent à répéter le message. Les résultats montrent aussi que si la perception du temps concernant la saisie varie en fonction de l'utilisateur, elle est considérée comme relativement longue. De manière globale, les objectifs ont été atteints dans la mesure où le dialogue n'a jamais été rompu et que les scénarios ont tous pu être menés au bout.

Prototypage et ... enseignement

L'interaction homme-machine est par essence un domaine privilégié pour une réflexion pluridisciplinaire. A contrario d'autres disciplines de l'informatique, celle-ci a l'avantage de pouvoir donner rapidement des résultats « tangibles » et palpables par les étudiants.

Malheureusement, l'enseignement de l'IHM au niveau Licence (1 à 3) reste trop souvent insatisfaisant. Les problèmes liés à la création et à la maintenance de travaux pratiques, les connaissances préalables à acquérir de la part des étudiants (langages, concepts...) et la réduction des volumes horaires d'enseignement amènent fréquemment les enseignants soit à renoncer à cette pratique soit à proposer des travaux pratiques en IHM centrés autour de la problématique des interfaces WIMP. Depuis quelques années, la technologie est suffisamment mûre et abordable du point de vue financier et permet d'appréhender une interaction « avancée ». Dans cet optique, nous avons tout d'abord expérimenté durant deux années (2015 et 2016) un enseignement « par projet » avec des étudiants de L1 volontaires. Depuis 2017, cet enseignement est intégré au cursus de L1 informatique comme unité d'enseignement optionnelle pour un groupe de TD (une quarantaine d'étudiants parmi 250 de première année en informatique cette année).

Cet enseignement s'effectue en lien étroit avec le FabLab¹¹ de l'université qui met à disposition son matériel : imprimantes 3D, découpeuse laser et machines CNC d'une part et avec le laboratoire commun IRIT/IJA « Cherchons Pour Voir¹² » qui permet à des professionnels de l'institut (enseignants, transcripteurs, ergothérapeutes...) de proposer des projets à destination d'enfants en situation de handicap. Outre ces différents acteurs, les doctorants, ingénieurs et chercheurs de l'équipe ELIPSE¹³ sont consultants techniques pour les différents groupes constitués. Enfin, les projets s'inscrivent dans le concours T'Hacka Voir¹⁴ organisé par « Cherchons Pour Voir ».

L'enseignement s'étale entre janvier et fin mai à raison de deux heures par semaine avec la possibilité d'étendre à quatre heures (en autonomie) au FabLab suivant les besoins. Les cinq premières séances sont réservées à appréhender les outils et logiciels utiles à la réalisation des projets : Arduino (avec un focus particulier sur les cartes Touch Board¹⁵ et Teensy¹⁶), OpenSCAD¹⁷ et Autodesk Fusion 360¹⁸ (pour les impressions 3D), Inkscape¹⁹ (pour la découpe laser), etc. Dès la troisième séance, les projets pré-sélectionnés sont présentés aux étudiants par l'équipe d'animation, ce qui permet d'adapter les outils et exercices aux besoins réels identifiés sur ces projets.

La suite des séances est dédiée au suivi et à l'avancement des projets et se termine par deux rendez-vous importants : une présentation formelle à destination des enseignants (dont l'objectif est de présenter le processus de conception et les aspects techniques) et une plus « festive » à l'IJA durant laquelle les projets sont présentés aux professionnels de l'institut et institutionnels (cf. figure 2).

Il ressort quelques éléments intéressants des retours étudiants. Sur l'organisation générale, il semble important de *capitaliser* le code produit d'une part et différencier le temps dédié au projet au long du semestre avec une montée en charge à la fin. Les étudiants s'avèrent très professionnels avec de bonnes interactions avec leurs conseillers et les professionnels de l'IJA.

Enfin, suivant les différents acteurs, le bilan reste contrasté :

— Pour les étudiants, il apparaît que de nombreux étudiants ont au départ choisi cet enseignement *par hasard* par méconnaissance mais sont *enchantés* de cette expérience tant à la fois technique, de gestion de projet et humaine. Il

11. <http://campusfab.univ-tlse3.fr>

12. <http://cherchonspourvoir.org>

13. <https://www.irit.fr/departement/intelligence-collective-interaction/elipse>

14. <https://thackavoir.fr>

15. <https://www.bareconductive.com/shop/touch-board>

16. <https://www.pjrc.com/teensy>

17. <http://www.openscad.org>

18. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>

19. <https://inkscape.org/en>

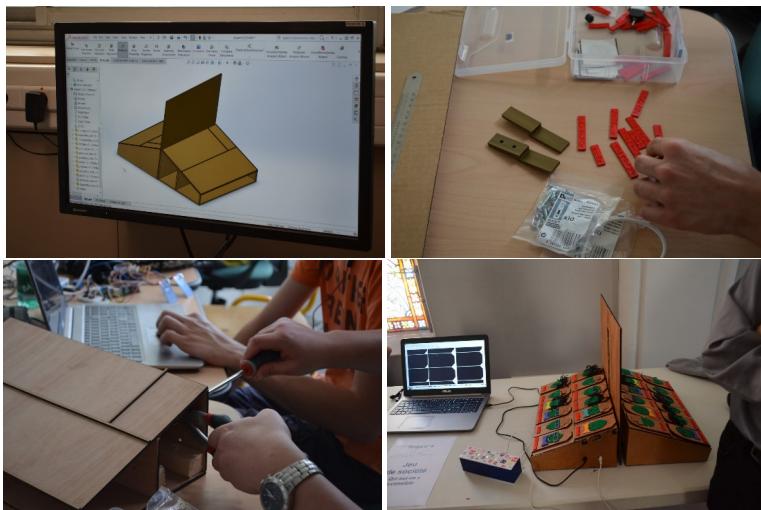


FIGURE 2. Exemple de projet réalisé – « Qui est-ce » pour permettre aux enfants aveugles de jouer avec un voyant.

ressort qu'ils ont eu le sentiment *d'avoir été utiles* en apportant des solutions et ont pu pour la première fois comprendre les besoins utilisateurs et apporter des solutions pratiques.

— Pour les enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs animateurs et consultants, ces projets ont demandé énormément de travail en amont et durant le déroulement notamment à cause de la multiplicité et l'hétérogénéité des propositions. Néanmoins, certains résultats sont *immédiatement transférables* sur des projets de recherche et a permis d'ouvrir de nouveaux horizons.

Enfin, nous avons pu constater que les résultats finaux dépendent fortement de l'implication plus ou moins forte des professionnels de l'IJA tout au long du projet.

Cette initiative suppose une forte mobilisation des enseignants, chercheurs et utilisateurs finaux ce qui reste forcément un frein à la généralisation de tels projets. Néanmoins, les retombées restent intéressantes à différents points de vue :

- utilisateur : l'innovation appelle l'innovation et les professionnels proposent des projets de plus en plus ambitieux ;
- recherche : la réalisation de prototypes par les étudiants sont repris et validés expérimentalement ;
- pédagogique : la proposition d'un enseignement qui permet d'explorer certes des aspects techniques nouveaux mais aussi une démarche de conception participative et d'initiation des méthodes de conception participative dès l'entrée en université.

CECI : des aides techniques pour des personnes en situation de poly-handicap

Dans le contexte de la conception de systèmes de suppléance, les outils et les méthodes de la conception centrée utilisateur (CCU) peuvent s'avérer inadaptés pour la participation des personnes en situation de polyhandicap (déficiences sensorielles, motrices et/ou cognitives). Cependant, exprimer un besoin est loin d'être aisé pour un utilisateur avec des troubles de la communication associés parfois à des troubles attentionnels et cognitifs. La mise en œuvre des activités de la CCU se heurte donc souvent à des difficultés dans la participation des personnes présentant des troubles de la communication. Par exemple, comment adapter un questionnaire pour le rendre plus accessible à une personne ayant une déficience cognitive ? Enfin, quelles solutions peuvent être mises en œuvre pour permettre aux utilisateurs de participer aux phases de conception malgré leurs déficiences [Vella et al., 2015, Benton et al., 2012] ?

Le système CECI (Contrôle d'environnement et communication intégrée) [Vella et al., 2015, Baudet et al., 2019] vise à rendre autonomes les personnes en situation de handicap (tétraplégie, *Locked-In Syndrom* (LIS), myopathie) qui ne peuvent pas communiquer ou contrôler leur environnement. CECI est composé de deux éléments : un boîtier de contrôle d'environnement et une interface de communication composée de pictogrammes et/ou de caractères latins.

L'objectif du travail est de concevoir une nouvelle méthodologie de conception centrée utilisateur (CCU) dans le domaine de la conception de systèmes de suppléance pour des personnes polyhandicapées résidant dans des Maisons d'accueil spécialisées (MAS). Nous avons adopté une approche spécifique en intégrant des données cliniques interprétées des personnes en situation de polyhandicap par le personnel médico-social. C'est une nouvelle approche pour pallier leur difficulté à identifier et/ou à exprimer leurs besoins en matière d'outils de suppléance.

Une batterie d'outils d'observation a été mise en œuvre par des ergothérapeutes, des psychologues et une étudiante en psychologie avec comme objectifs de qualifier les capacités motrices, de communication, d'empan mnésique, d'attention visuelle, de capacités de raisonnement et d'apprentissage. Une grille d'analyse fonctionnelle vient compléter ces mesures. Elle vise à décrire les modalités de comportement de communication, à comprendre le contexte d'apparition d'un comportement de communication et/ou d'interaction du participant, de même que sa nature et modalité, puis les réponses apportées par son écosystème. De plus, la grille permet d'identifier ses activités quotidiennes, ses centres d'intérêts et permettra, à terme, de spécifier les fonctionnalités du prototype haute-fidélité CECI.

Le véritable apport de ces sources de données est en cours de mesure lors de la phase d'appropriation de l'aide technique et de son adaptation aux exigences de la personne en situation de handicap.

TaBGo : une version du langage Scratch

Depuis la réforme du collège en 2016²⁰, les outils de programmation visuelle par blocs (comme le langage Scratch²¹) sont préconisés pour permettre la découverte de la programmation. Il s'avère que ces outils sont peu, voire pas du tout accessibles, ce qui peut amener à l'exemption de l'épreuve d'algorithme au diplôme national du brevet²².

Nous étudions depuis 2018 une solution permettant de rendre accessible l'utilisation de ces langages par blocs pour des élèves non-voyants [Marco et al., 2018].

La solution globale comprend deux aspects. Il s'agit, d'une part, de proposer un système permettant la manipulation physique de briques en bois représentant les blocs de base du langage Scratch. Ces pièces, une fois assemblées, forment un algorithme qui est interprété par un ordinateur à l'aide d'outils de reconnaissance visuelle. D'autre part, le deuxième enjeu est d'intégrer ces outils d'interaction (robots, sorties tactiles ou sonores) rendant l'exécution des algorithmes compréhensibles pour un utilisateur non-voyant.

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'apprentissage par objets tangibles de la programmation pour des étudiants non-voyants ou non. Ces solutions, quoiqu'intéressantes ne s'appliquent que peu à la programmation par blocs pour non-voyants. En effet, ces langages tels que Scratch offrent une interface visuelle particulière dont les instructions sont des blocs ayant une forme spécifique au langage. Les travaux évoqués précédemment proposent seulement des outils généraux d'apprentissage de l'algorithme pour les déficients visuels et n'offrent pas, par exemple, la possibilité d'emboîter des blocs d'instructions pour concevoir un algorithme. Quelques enseignants spécialisés en France (comme [Boissel, 2017]) se sont aussi penchés sur le problème de la construction des algorithmes de manière *débranchée* (c'est-à-dire programmer sans utiliser d'ordinateur). Cependant, ces adaptations comportent là encore des limites car elles n'ont pas été pensées de sorte que l'algorithme puisse être partagé et directement exécuté par un ordinateur rendant la pratique de la programmation restreinte à la conception.

Notre dispositif consiste donc en une version tangible du logiciel Scratch couplé avec une reconnaissance optique des blocs et des valeurs pouvant être contenues (cf. figure 3). Nous avons réalisé différents prototypes constitués d'un ensemble de blocs de bois par découpe laser. Ces pièces correspondent aux briques de base du

20. Bulletin officiel spécial n°11 du 26 novembre 2015, http://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_11/35/1/BO_SPE_11_26-11-2015_504351.pdf

21. <https://scratch.mit.edu>

22. Arrêté du 28 mars 2018, article 4, https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=A2396BAB1360E8551D4D85DEFFF0A658.tplgfr32s_2?cidTexte=JORFTEXT000036843926&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT000036843607

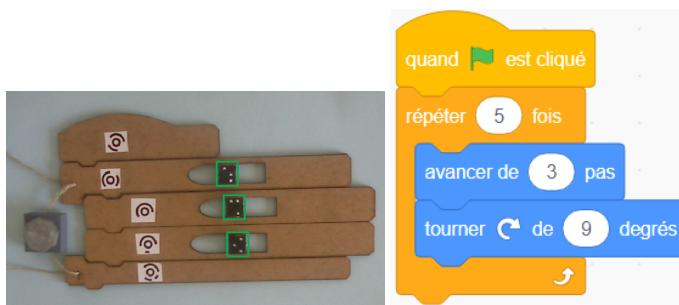


FIGURE 3. Programme Scratch tangible et programme produit sur ordinateur.

langage Scratch. Nous avons notamment testé différentes tailles et différents matériaux pour la représentation physique des briques du simple carton à des blocs en plastique coloré avec description en braille du bloc.

Le processus de génération d'un projet Scratch à partir d'un algorithme assemblé avec des blocs se déroule de la manière suivante :

- reconnaissance des codes de réalité augmentée (ici, des TopCodes²³) ;
- reconnaissance des informations des cubarithmes²⁴ (cubes algébriques braille). Le principe est de reconnaître l'emplacement des cubarithmes dans un premier temps avant de procéder à la reconnaissance des valeurs ;
- connaissant l'emplacement des cubarithmes, nous pouvons alors appliquer l'algorithme de reconnaissance de caractères braille ;
- création d'une liste contenant les TopCodes ainsi que les cubarithmes reconnus. Cette liste est ensuite triée relativement aux coordonnées spatiales des objets reconnus ;
- génération du code JSON pour chaque élément de la liste obtenue, génération ;
- sauvegarde du fichier généré exploitable directement par Scratch 3.0.

L'acceptation par les utilisateurs non-voyants d'un tel dispositif débranché a déjà été évaluée notamment par [Boissel, 2017]. Notre proposition permet de les rendre autonomes par la génération et l'exécution automatique de leur programme.

Cependant, l'évaluation de l'efficacité pédagogique du dispositif proposé reste à évaluer mais ne sera possible que lorsque le retour non visuel du programme ainsi généré sera implanté (par un robot ou via un *feedback* audio, etc.). L'apport par exemple en termes de collaboration avec des élèves voyants et d'inclusion reste aussi à évaluer.

23. <http://users.eecs.northwestern.edu/~mhorn/topcodes/>

24. <http://www.enfant-aveugle.com/spip.php?article265>

Conclusion

Au travers de ces quelques exemples, nous avons souhaité montrer que l'informatique au sens large permettait d'explorer des solutions innovantes adaptées au plus près des besoins des personnes à besoin spécifiques. Il n'est pas non plus forcément nécessaire d'être un codeur expérimenté pour pouvoir apporter des solutions utiles et utilisables.

Nous pensons qu'il est essentiel de travailler sur ce point de manière pluridisciplinaire. Il reste bien évidemment de larges champs à explorer dans ce domaine. Enfin, nous soulignons que toutes les recherches menées dans le cadre du handicap, au-delà de leur aspect social et humain évidents, ont très souvent un fort impact sur l'innovation : la télécommande est un bel exemple de technologie développée pour les personnes handicapées moteurs et utilisée quotidiennement par toute la population.

Références

- [Arnowitz et al., 2006] Arnowitz, J., Arent, M., and Berger, N. (2006). *Effective Prototyping for Software Makers*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- [Baudet et al., 2019] Baudet, R., Carrau, X., Vella, F., Truillet, P., Camps, J.-F., Mercadier, C., Gigaud, K., Fourgous, V., Blanchard, M., Serpa, A., and Vigouroux, N. (2019). Contribution of clinical data to the design of assistive systems. In *Annexes des actes de la 31e conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2019)*, pages 12 :1–7, Grenoble, France. ACM.
- [Benton et al., 2012] Benton, L., Johnson, H., Ashwin, E., Brosnan, M., and Grawemeyer, B. (2012). Developing ideas : supporting children with autism within a participatory design team. In *CHI '12 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2599–2608, USA United States. Association for Computing Machinery.
- [Boissel, 2017] Boissel, S. (2017). Scratch débranché en braille et gros caractères. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 77(1) :183–192.
- [Brochard et al., 2007] Brochard, S., Pedelucq, J.-P., Cormerais, A., Thiebaut, M., and Rémy-Néris, O. (2007). [satisfaction with technological equipment in individuals with tetraplegia following spinal cord injury]. *Annales de réadaptation et de médecine physique : revue scientifique de la Société française de rééducation fonctionnelle de réadaptation et de médecine physique*, 50 :78–84.
- [de Boer et al., 2009] de Boer, I. G., Peeters, A. J., Ronday, H. K., Mertens, B. J. A., Huizinga, T. W. J., and Vliet Vlieland, T. P. M. (2009). Assistive devices : usage in patients with rheumatoid arthritis. *Clinical Rheumatology*, 28(2) :119–128.
- [Hurst and Tobias, 2011] Hurst, A. and Tobias, J. (2011). Empowering individuals with do-it-yourself assistive technology. In *The Proceedings of the 13th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '11, page 11–18, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Kane et al., 2009] Kane, S. K., Jayant, C., Wobbrock, J. O., and Ladner, R. E. (2009). Freedom to roam : A study of mobile device adoption and accessibility for people with visual and motor disabilities. In *Proceedings of the 11th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Assets '09, page 115–122, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

- [Kemoun et al., 1997] Kemoun, Lefebvre-Donze, and Magnier (1997). Qualité de vie des personnes handicapées à domicile : impact de l'action d'une équipe pluridisciplinaire de soutien. In *Appel d'offres APF*.
- [Laffont et al., 2008] Laffont, I., Biard, N., Bouteille, J., Pouplin, S., Guillon, B., Bernuz, B., and Rech, C. (2008). Tétraplégie : solutions technologiques de compensation des incapacités découlant de l'atteinte des membres supérieurs. *La Lettre de médecine physique et de réadaptation*, 24(3) :113–121.
- [Marco et al., 2018] Marco, J.-B., Baptiste Jessel, N., and Truillet, P. (2018). TaBGO : Programmation par blocs tangibles. In *30e Conference francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2018)*, pages 179–185, Brest, France.
- [Muller and Kuhn, 1993] Muller, M. J. and Kuhn, S. (1993). Participatory design. *Commun. ACM*, 36(6) :24–28.
- [Phillips and Zhao, 1993] Phillips, B. and Zhao, H. (1993). Predictors of assistive technology abandonment. *Assistive Technology*, 5(1) :36–45. PMID : 10171664.
- [Pino and Brangier, 2000] Pino, P. and Brangier, E. (2000). Environnement digital de téléactions pour handicapés : Adaptation automatique du temps de défilement aux caractéristiques et intentions de l'utilisateur.
- [Rogers, 1995] Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations*. Simon and Schuster.
- [Vella et al., 2003] Vella, Vigouroux, and Truillet (2003). A user-centered approach for designing clapotis : an assistive technology designed for speech and motor disorders. In *AAATE*, pages 289–293.
- [Vella et al., 2015] Vella, F., Sauzin, D., Truillet, P., Vial, A., and Vigouroux, N. (2015). Co-design of the Medical Assistive and Transactional Technologies system. In *Journées RITS 2015*, pages pp 122–123, Dourdan, France. Congrès sous l'égide de la Société Française de Génie Biologique et Médical (SFGBM).
- [Verdonck et al., 2009] Verdonck, M., Steggles, E., and Chard, G. (2009). The meaning of living with or without environmental control systems for people with tetraplegia : An irish focus group study. In *Volume 25 : Assistive Technology from Adapted Equipment to Inclusive Environments*, pages 297–302.



Le projet *GazePlay* : des jeux ouverts, gratuits et une communauté pour les personnes en situation de polyhandicap

Didier Schwab¹, Sébastien Riou¹, Amela Fejza²,
Loïc Vial¹, Johana Marku¹, Wafaa El Husseini¹,
Sannara Ek¹, Miles Bardon³, Yann Robert⁴

*Afin de développer et d'améliorer une communication augmentée et alternative (CAA), le regard est souvent considéré comme l'un des moyens les plus naturels et les plus faciles à mettre en place pour permettre aux personnes en situation de polyhandicap d'interagir avec leur environnement. Bien entendu, pour des enfants qui partent par nature de zéro, qui de plus ont de telles difficultés, c'est déjà un grand défi d'acquérir et de soutenir les connaissances de base que cette communication requiert. Les jeux sont souvent considérés comme un bon moyen d'apprendre. Les jeux destinés à être utilisés avec des oculomètres (eye-trackers), c'est-à-dire des dispositifs électroniques capables d'estimer la position du regard, peuvent être un bon moyen d'améliorer les compétences requises comme la fixation et la poursuite oculaire, ainsi que des conventions comme les récompenses ou les interactions de fixation (dwell interaction) souvent utilisées dans les outils de CAA. Dans cet article, nous présentons le projet *GazePlay* dont la principale contribution est un logiciel libre et gratuit qui rassemble plusieurs mini-jeux compatibles avec tous les oculomètres, y compris les moins chers.*

1. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Inria, LIG, {prenom.nom}@univ-grenoble-alpes.fr.

2. amela.fejza@grenoble-inp.org.

3. Indépendant, milesbardon@gmail.com.

4. Anantaplex, yann.robert@anantaplex.fr.



Cet article est la version française augmentée et corrigée de [16]. Les auteurs tiennent à remercier leurs inspiratrices Tess, Isabel, Diane, Gabriella et Roxane. Nous faisons tout cela pour leur sourire et, bien sûr, leurs beaux yeux.

Introduction

Que feriez-vous si vous étiez privé de la parole et incapable de faire le moindre geste ? Cette situation peut arriver à tout le monde. Elle peut arriver simplement après une opération un peu fatigante ou un accident. Il est alors probable que le personnel de l'hôpital va vous montrer des images, des pictogrammes pour que vous lui indiquiez si vous avez mal, à quel endroit, si vous avez soif ou vous poser des questions sur d'autres besoins primaires. Cette situation peut être également plus longue, voire définitive, et le besoin de communication devient alors plus complexe et peut recouvrir l'ensemble des objectifs d'une communication classique. C'est la situation que peuvent connaître les personnes touchées par des maladies neurodégénératives, qu'elles soient liées à l'âge (syndrome d'Alzheimer) ou non (sclérose latérale amyotrophique – SLA – connue également sous le nom de maladie de Charcot). Une telle communication est appelée communication augmentée et alternative (CAA). Imaginez maintenant un enfant qui naît avec un polyhandicap parce qu'il a été victime d'une naissance prématurée, d'une anomalie chromosomique (syndrome de Rett, d'Angelman, de Prader-Willis...), d'infections ou d'accidents. Il va avoir un handicap physique sévère (difficultés pour utiliser ses bras et ses jambes) et un handicap intellectuel (désordre neuro-développemental), les deux étant généralement liés. Afin de développer et d'améliorer une CAA, le regard est souvent considéré comme l'un des moyens les plus naturels et des plus faciles à mettre en place pour aider les personnes en situation de polyhandicap à interagir avec leur environnement. Bien entendu, pour des enfants qui partent par nature de zéro, qui de plus ont de telles difficultés, c'est déjà un grand défi d'acquérir et de soutenir les connaissances de base que cette communication requiert. Ils doivent apprendre la puissance de leurs yeux, les conséquences des actions déclenchées par leur regard mais aussi travailler leurs muscles extraoculaires... Les jeux sont souvent considérés comme un bon moyen d'apprendre. Dans le cas du suivi visuel, les jeux vidéo pourraient être ainsi un bon moyen d'améliorer les compétences requises comme la fixation et la poursuite oculaire, ainsi que des conventions comme les récompenses ou les interactions de fixation (*dwell interaction*) souvent utilisées dans les outils de CAA.

Dans cet article, nous présentons le projet *GazePlay*⁵ dont les principales contributions sont :

— *GazePlay*⁶ est un logiciel gratuit et *open-source* qui regroupe plusieurs

5. *GazePlay* signifie jeux de regard en anglais.

6. <https://gazeplay.net>.

mini-jeux jouables avec tous les oculomètres, y compris les plus économiques. Il permet aux gens d'accéder à de tels jeux à un prix qui décroît de 2 000–3 000 € à 100–160 € hors prix de l'ordinateur/tablette numérique.

— *TobiiStreamEngineForJava*⁷ est une bibliothèque ouverte Java qui relie la bibliothèque C++ de Tobii à Java. Avec son aide, il est possible de développer des logiciels capables d'interagir avec les oculomètres peu coûteux de Tobii (Tobii EyeX, Tobii 4C).

— *GazePlay github*⁸ est un dépôt public hébergé par GitHub qui nous aide à gérer le développement de GazePlay. À ce jour, quatorze personnes ont contribué directement au code et des dizaines aux idées (y compris des thérapeutes et des parents).

La communication alternative et augmentée (CAA)

Selon l'ASHA (*American Speech-Language-Hearing Association*⁹), la communication alternative et augmentée répond aux besoins des individus avec des troubles de communication importants et complexes caractérisés par des déficiences de la parole, que ce soit en production ou en compréhension. On dit que la CAA est :

- augmentée lorsqu'elle est utilisée pour compléter un langage préexistant;
- alternative lorsqu'elle est utilisée en remplacement d'un langage non existant ou dysfonctionnel;
- temporaire lorsqu'elle est utilisée par les patients en postopératoire ou en soins intensifs;
- permanente lorsqu'elle est utilisée par une personne qui aura besoin d'une forme quelconque de CAA tout au long de sa vie.

La CAA utilise une variété de techniques et d'outils :

- objets tangibles (boutons, claviers, images plastifiées...);
- gestes comme la langue des signes mais aussi des gestes associés au discours ou à des images comme pour le Makaton ;
- pictogrammes des images correspondant à un mot ;
- logiciels de synthèse vocale qui permettent de synthétiser la parole à partir de texte ou de pictogrammes ;
- oculomètres (*eye-trackers*) qui permettent aux personnes qui ne peuvent pas utiliser leurs membres d'interagir avec un ordinateur, c'est ce médium que nous intéressera plus particulièrement dans cet article.

7. <https://github.com/coylz/TobiiStreamEngineForJava>

8. <https://github.com/GazePlay/GazePlay>

9. <https://www.asha.org/practice-portal/professional-issues/augmentative-and-alternative-communication/>

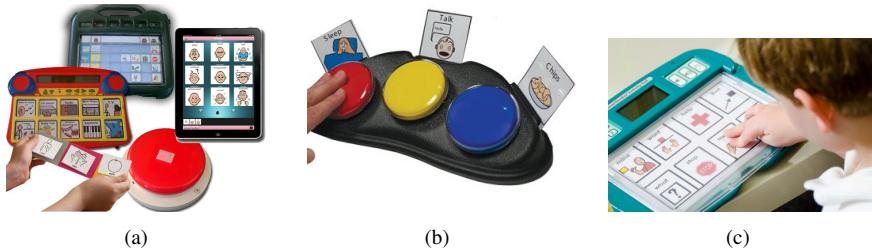


FIGURE 1. (a) Divers objets tangibles de la CAA, (b) association de boutons et de pictogrammes, (c) un enfant qui appuie sur un pictogramme, son appareil va synthétiser le nom du pictogramme afin que le message puisse être entendu par l'interlocuteur.

Le polyhandicap

Le terme « polyhandicap » a été utilisé pour la première fois dans un article scientifique en 1969 par Elisabeth Zucman, médecin en réhabilitation fonctionnelle. Elle a, par la suite, apporté une définition plus précise du polyhandicap en 1984 [22] en le décrivant comme « le handicap grave à expressions multiples avec restriction extrême de l'autonomie et déficience intellectuelle sévère ». Ce handicap, conjonction d'un handicap physique sévère (grandes difficultés, voire impossibilité, pour utiliser ses bras et ses jambes) et d'un handicap intellectuel (désordre neuro-développemental), les deux étant généralement liés, peut avoir des causes diverses : naissance pré-maturée, anomalies chromosomiques (syndrome de Rett, d'Angelman, de Prader-Willis...), infections, blessures dues à des accidents. Malgré un taux de prévalence qui s'élevait, d'après une étude de Salbreux, de 2 à 2,5 pour mille en 1979 en Île-de-France [2], les solutions actuellement apportées pour comprendre et améliorer la communication des personnes atteintes de ces handicaps restent minces. Les personnes qui ne parlent pas ou peu sont encore très mal intégrées dans notre société. Cette situation est encore plus vraie lorsque elle est associée à une déficience intellectuelle. Dès les années 1930, Lev Vygotski (1896-1934) identifiait un cercle vicieux pour les enfants avec surdité (voir figure 2) : « *L'éducation sociale s'arrête devant le langage insuffisamment développé, le langage insuffisamment développé entraîne la séparation de la collectivité, et la séparation de la collectivité freine en même temps l'éducation sociale et le développement du langage* » [13].

La sortie de ce cercle vicieux passe, d'après Vygotski, par une meilleure connaissance du potentiel de communication des personnes, et par le développement de ce

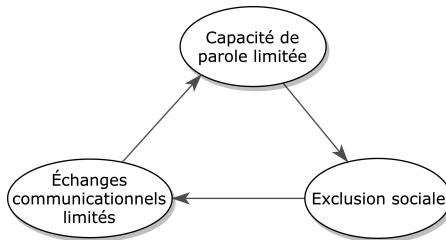


FIGURE 2. Cercle vicieux décrit par Vygotski

potentiel, via ce qu'il appelait déjà la polyglossie¹⁰; c'est-à-dire par la multiplication des formes de développement du langage.

À cause des limites extrêmes liées au polyhandicap, l'autonomie (déplacements, se nourrir et boire...), les relations avec les autres (communication, compréhension...), il reste très difficile d'évaluer exactement (tests peu adaptés) ce que ces personnes sont ou ne sont pas dans la capacité de comprendre. Cette situation rend la sortie de ce cercle vicieux d'autant plus difficile. Néanmoins, la polyglossie décrite par Vygotski s'est tout de même grandement enrichie ces trente dernières années avec le développement de la CAA. Cette dernière, évidemment largement perfectible, a pu faire ses preuves auprès des personnes en situation de polyhandicap, comme l'ont présenté les études de Chirvasiué [1, 17], allant même jusqu'à s'allier au pouvoir du regard, pour proposer des solutions encore plus efficaces comme celles montrées par Townend [5, 14], qui ont mis en place une CAA basée sur le regard, avec deux jeunes filles atteintes du syndrome de Rett. Enfin, notons l'initiative du C-BiLLT [4], un test destiné à évaluer la compréhension des enfants en situation de polyhandicap et mettant en jeux des oculomètres. Ce test n'a toutefois pas encore été porté en français.

Œil, regard et oculomètres

L'œil est l'organe sensoriel de la vision. Les yeux des humains permettent de voir des images en trois dimensions et en couleurs. Ils exécutent des mouvements spécifiques [21, 18] :

- Une saccade se produit lorsque les yeux se déplacent d'un point d'intérêt à un autre.
- Une poursuite se produit lorsque les yeux suivent une cible en mouvement.

10. Voir ce billet sur le blog d'Amélie Rochet-Capellan, chercheure CNRS au Gipsa-Lab et maman : <https://adorabletoi.com/2019/02/23/vygotsky-un-petit-passage-dont-je-veux-garder-la-trace/>

- Une fixation se produit lorsque les yeux cessent de balayer la scène et que la vision se stabilise en un seul endroit afin de saisir des informations détaillées sur l'objet ou la scène sur laquelle elle est focalisée.
- Le clignement consiste en une fermeture suivie rapidement d'une ouverture de la paupière. De manière spontanée, le clignement sert à protéger l'œil en l'humidifiant; de manière volontaire, il peut être utilisé pour rétablir une communication de base.

On peut faire remonter les études utilisant des mécanismes pour estimer les mouvements des yeux à la fin des années 1870 [20]. Chacun de leur côté, Ewald Hering (1834–1918) et Lamare¹¹ utilisent un dispositif posé sur la paupière pour mieux comprendre les mécanismes de la lecture. En plaçant un bout d'un tube de caoutchouc sur la paupière d'un sujet, il est possible d'entendre, à l'autre bout, le bruit des contractions musculaires actionnant l'œil [19]. Un observateur peut ainsi noter le nombre et la longueur des saccades pendant la lecture de textes écrits. Les premières expériences mettant en œuvre un oculomètre datent de 1898. Edmund Burke Delabarre (1863–1945) et Edmund Burke Huey (1870–1913) conçoivent chacun de leur côté un système similaire et très invasif pour estimer la position du regard, ici encore pour mieux comprendre les mécanismes de la lecture. Une sorte de lentille de contact en plâtre, trouée pour correspondre au centre de la pupille, sur laquelle on fixe un fil relié à une aiguille (un stylet) pour enregistrer les mouvements sur une feuille enfumée. L'expérience se déroule sans dommage pour l'œil préalablement anesthésié avec quelques gouttes de cocaïne. De nos jours, les oculomètres sont bien moins invasifs. Il s'agit généralement de caméras infrarouges qui fournissent des coordonnées brutes à partir desquelles il est possible d'estimer la fixation, les saccades et les poursuites oculaires [15, 8]. Plusieurs sociétés construisent des oculomètres pour le marketing, pour la réalité virtuelle ou augmentée, ou encore pour évaluer la vigilance des conducteurs [10].

Dans le monde du handicap, l'interaction basée sur le regard est utilisée depuis le début des années 1980 [3] mais la principale avancée sur l'interaction est proposée dans [7], où plusieurs solutions sont introduites et comparées, dont l'interaction par fixation (*dwell interaction*) qui est souvent utilisée pour sélectionner dans les logiciels de CAA. Le coût d'un oculomètre était encore très élevé et difficilement abordable pour la majorité des familles concernées il y a encore peu de temps. Par exemple, en France, le coût d'un oculomètre de base pour les personnes en situation de handicap est encore supérieur à 1200 € en mars 2018; le montant était approximativement le double un an avant.

11. Lamare faisait partie de l'équipe du célèbre ophtalmologiste français Louis Émile Javal (1839–1907). Ses travaux sont présentés et commentés dans [9, Chapitre XIII]. Nous nous sommes révélés incapables de trouver plus d'information sur sa vie, y compris son prénom.

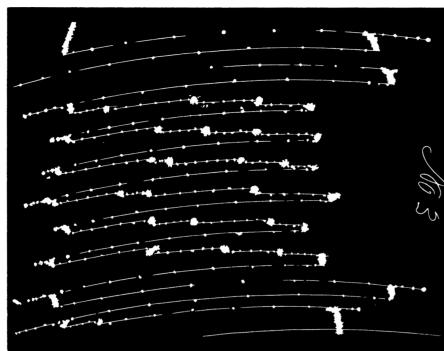


FIGURE 3. L'expérience de Huey (1900). On distingue clairement les saccades (les traits se terminant par un petit rond) et la forme globale du texte lu.

Dès 2013, l'entreprise Eye-Tribe est la première à créer des oculomètres plus abordables (≈ 100 €) avec une API Java élégante et compatible à la fois avec Windows et OS X. Tobii, l'entreprise numéro un mondiale des oculomètres, a suivi en sortant son EyeX (2014, ≈ 100 €), suivi du Tobii 4C (2016, ≈ 160 €), et leur bibliothèque C++. Alors que l'Eye-tribe a été vendue à Facebook pour sa division Oculus et n'est plus développée, Tobii continue à faire évoluer ses oculomètres bon marché et leurs outils associés (multiples utilisateurs, trace du regard sur l'écran, etc.). Ces trois oculomètres peuvent être utilisés avec GazePlay. Nous intégrons directement la bibliothèque Eye-Tribe tandis que notre équipe a développé une interface native Java (*Java Native Interface*) pour construire une bibliothèque Java exploitant la bibliothèque C++ de Tobii, TobiiStreamEngineForJava. Elle permet ainsi d'utiliser facilement le Tobii EyeX et le Tobii 4C avec Java.



FIGURE 4. Deux des oculomètres qui permettent de jouer avec GazePlay : l'Eye Tribe en haut, le Tobii 4C en bas.

GazePlay

Nous présentons dans cette section, GazePlay 1.7, la version de GazePlay publiée en janvier 2020. GazePlay est un logiciel libre et gratuit qui rassemble une soixantaine de mini-jeux jouables avec un oculomètre. Il est compatible avec tous les oculomètres pouvant contrôler le curseur de la souris et avec le Tobii EyeX et le Tobii 4C sur Windows et l'Eye Tribe Tracker sur Windows ou MacOs X. Pour augmenter la motivation des joueurs, il est très facile de modifier les images par défaut du jeu. En effet, certains joueurs préféreront jouer avec des images issues de Mickey Mouse tandis que d'autres voudront jouer avec des images issues de Princesse Sofia, de leur famille ou de leurs thérapeutes. Une autre façon d'aider à motiver les joueurs est de leur donner une récompense (un grand emoji heureux et des applaudissements). Les jeux et l'interface peuvent être affichés en français, anglais, allemand et néerlandais et sont également partiellement traduits dans une vingtaine d'autres langues.

Les jeux de GazePlay

GazePlay 1.7 rassemble 58 jeux¹², chacun proposant plusieurs variantes de difficulté, de taille, etc.. On compte ainsi 151 jeux et variantes. Pour chacun d'entre eux, nous visons à développer une ou plusieurs compétences chez les enfants. On peut actuellement considérer cinq grands types de compétences pouvant être développées grâce à GazePlay : les compétences d'action-réaction, de sélection, de mémorisation, de littératie et de logique & mathématiques.



FIGURE 5. Capture du menu principal de GazePlay (version de développement du 10 janvier 2020). La version 1.7 comporte 58 jeux et 151 variantes.

12. Pour une description complète des jeux, voir <https://github.com/GazePlay/GazePlay/blob/master/Games-eng.md>.



FIGURE 6. Un enfant qui joue au jeu Tartes à la crème avec l'oculomètre d'Eye Tribe.

Compétence d'action-réaction

Dans ce genre de jeux, nous voulons apprendre aux enfants qu'un regard peut avoir diverses conséquences directes sur ce qui se passe à l'écran. Par exemple, dans le jeu Tartes à la crème (cf. figure 6), l'utilisateur lance une tarte à la crème sur la cible quand il la regarde dans *Block*, une grande image est cachée par des blocs colorés. Le joueur doit simplement regarder un bloc pour le faire disparaître. Lorsque tous les blocs ont disparu, la partie est terminée et la récompense est affichée. Dans le jeu Ninja, la cible explose dès que le joueur la regarde, et dans le jeu de Piano un son va être joué dès qu'il regarde une touche illuminée. De nombreux autres jeux tels que ceux-ci permettent ainsi de prendre conscience de l'éventail des nombreuses actions possibles, réalisables simplement en regardant l'écran, et de comprendre le lien direct avec les réactions que ces actions vont entraîner.

Compétence de sélection

Bien que dans ces jeux d'action-réaction l'interaction avec un objet à l'écran soit généralement directe (regarder un objet déclenche immédiatement la réaction), il est très important d'entraîner l'enfant à un autre système de sélection. Une sélection s'effectuant en un simple regard comme ici amène inévitablement au problème du toucher de Midas [11]. Comme le célèbre roi mythologique grec transformait tout ce qu'il touchait en or, n'importe quel objet regardé à l'écran est alors sélectionné, même si ce n'est pas l'intention de l'utilisateur. D'autres systèmes de sélection doivent ainsi être proposés et entraînés.

La sélection avec un oculomètre ne peut ainsi pas être aussi directe qu'avec une souris. Ce qui se rapprocherait le plus d'un clic de souris pourrait être le clignement d'œil mais il n'est pas facile à mettre en pratique car (1) le clignement volontaire n'est pas facile à distinguer du clignement involontaire, (2) il est souvent très difficile à réaliser pour un enfant souffrant de polyhandicap.

Dans les programmes de CAA, une façon habituelle de sélectionner un élément (photo, image, pictogramme, etc.) est de garder le regard sur cet élément. On l'appelle « une interaction d'occupation [7] » ou « par temps de fixation » (*Dwell-time* en anglais). Un retour visuel est donné à l'utilisateur sous la forme d'une barre de progression circulaire. Lorsqu'elle est pleine, après un temps configurable, l'élément est sélectionné [12]. Dans le jeu Cartes magiques de GazePlay, plusieurs cartes sont affichées. Quand le joueur regarde une carte, elle est retournée. Une des cartes cache une image, la récompense est offerte lorsque l'utilisateur trouve l'image. D'autres jeux comme Memory et Où est-ce ? permettent également de travailler la compétence de sélection en utilisant cette même interaction.

Compétence de mémorisation

Dans ces jeux, nous voulons travailler sur la mémoire à court terme comme dans Memory qui a les mêmes règles que le jeu classique. Plusieurs paires de cartes sont disposées face cachée. Le joueur avec une interaction de fixation (voir section précédente) retourne deux cartes. Si elles sont les mêmes, elles disparaissent, sinon, après quelques secondes pour permettre au joueur de s'en souvenir, elles se retournent. Quand toutes les paires ont été trouvées, la récompense est offerte.

Dans d'autres jeux, nous voulons travailler sur la mémoire à long terme. Dans le jeu Où est l'animal ?, une phrase est prononcée et écrite pour indiquer au joueur quel animal trouver (cheval, chien, crocodile...). Plusieurs photos d'animaux sont ensuite montrées (4 à 12 suivant le choix effectué). Le joueur sélectionne les photos jusqu'à ce qu'il trouve la photo correspondant à l'animal demandé. Des variantes de ce même jeu sont proposées pour apprendre les couleurs ou encore les nombres. Une dernière variante est complètement configurable, c'est-à-dire que les parents, les thérapeutes, peuvent construire leurs propres jeux avec leurs propres photos. La phrase peut être complétée par un pictogramme, par exemple pour les apprendre aux enfants (voir figure 7). Ce dernier jeu et l'utilisation des pictogrammes ont été inspirés par la communauté (voir la section Communauté).



FIGURE 7. Capture du jeu Où est-ce ? : la question posée est associée à un pictogramme issu du Makaton [6].

Compétence liées à la littératie

La littératie regroupe les connaissances fondamentales dans les domaines de la lecture et de l'écriture. Dans le cadre de la communication alternative et augmentée, il s'agit d'un objectif à long terme pour le public que nous visons. En ce qui concerne GazePlay, nous voyons les compétences actuelles visées comme un premier pas vers la littératie. Divers jeux sont proposés, comme le jeu de Memory avec des lettres, mais également le jeu Identifiez la lettre qui demande à l'enfant de sélectionner les blocs contenant une certaine lettre parmi un texte contenant des lettres différentes. À chaque bonne sélection la lettre est prononcée, aidant l'enfant à faire l'association entre la forme de la lettre et le son correspondant. De la même manière, d'autres jeux comme les jeux Où est cette couleur ?, Où est cet animal ?, Où est ce nombre ? ... permettent également d'associer des concepts à leur prononciation, par le biais de la répétition des questions.

Compétences logiques et mathématiques

Dans le cas du polyhandicap, comme nous l'avons vu dans la section correspondante précédemment, l'accès à un enseignement scolaire « classique » est généralement impossible, l'importance des mathématiques et de la logique dans leur éducation ne peut pas être ignorée. Des jeux simples de question-réponse, avec un écran présentant peu de distracteurs visuels, comme dans la suite de jeux « Apprends les maths » peut permettre de comprendre l'association d'une opération à un résultat.

Pour ce qui est des compétences de logique, de nombreux jeux peuvent permettre à l'enfant de comprendre les logiques d'ordre ou de déplacement des objets. On retrouve, par exemple, le jeu de Gobelet Pass Pass, dans lequel il va devoir retrouver une balle cachée sous un verre, après que les verres aient été mélangés.

D'autres compétences encore, comme le fait de comparer ou de recréer un modèle, peuvent aussi être entraînées avec le jeu Trouver les différences dans lequel il va devoir trouver les différences entre deux images données, ou bien dans La fabrique à gâteaux, où il va devoir reproduire à l'identique le modèle d'un gâteau affiché à l'écran en sélectionnant les éléments qui lui correspondent.

Analyses

Lorsqu'un jeu est arrêté, plusieurs statistiques sont affichées et sauvegardées automatiquement (voir figure 8). Elles présentent, suivant le jeu, la durée de temps de jeu actif, la durée de temps de jeu réel, la durée de réaction, l'écart type, le nombre de bonnes réponses... Une carte de chaleur améliorée (figure 9) montre également les positions qui ont été regardées à l'écran et un tracé permet de connaître plus en détail le chemin qu'a emprunté le regard de l'utilisateur et les temps de fixation pour chacune des zones sur lesquelles son regard s'est arrêté. Ces zones sont appelées des zones d'intérêt et sont des données qui peuvent s'avérer très intéressantes pour

le suivi de l'enfant, par exemple, pour observer le fait qu'il soit bien dans la capacité d'observer l'entièreté de l'écran ou si, au contraire, certaines zones semblent plus difficiles d'accès. L'enregistrement vidéo de l'écran et du regard est également disponible pour chaque partie. Grâce à ces statistiques, l'entourage parental et thérapeutique peut obtenir des informations objectives pour évaluer l'évolution et/ou la motivation des enfants.



FIGURE 8. Capture des statistiques affichées à la suite du jeu Memory (compétence mémorisation).

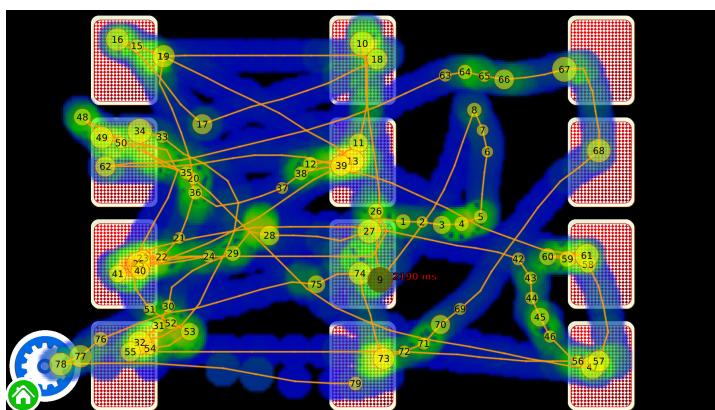


FIGURE 9. Capture de la carte de chaleur d'une partie de Memory (compétence mémorisation).

Communauté

Le logiciel est libre sous licence GNU General Public License v3.0¹³. Tout le monde peut le modifier mais doit distribuer le code dès lors qu'il diffuse une nouvelle version. Il est évidemment possible de vendre des versions spécifiques de GazePlay (du moment que l'on redistribue le code) ou des services utilisant GazePlay, y compris des thérapies ou des formations sans rétribuer les auteurs.

Le projet GazePlay a commencé sous l'initiative du premier auteur qui est à la fois maître de conférences en informatique et père d'une enfant en situation de polyhandicap. En partageant son expérience avec d'autres parents, en particulier ceux qui possèdent des oculomètres pour leur enfant et avec des thérapeutes, il a travaillé avec des étudiants en master et en doctorat (Amela Fejza et Loïc Vial) pour sortir les premières versions de GazePlay en juillet-octobre 2017. Chaque année, d'autres étudiants en master à Grenoble viennent régulièrement enrichir l'équipe durant plusieurs mois, pour leur stage de deuxième semestre (Johana Marku, Wafaa El Husseini, Sannara Ek et surtout Sébastien Riou qui est devenu, après son master, le premier développeur travaillant sur le projet).

Le code est hébergé sur GitHub. Le dépôt permet de partager le code, des informations pour les développeurs, des rapports (*issues*) pour poser une question, rapporter un *bug*, proposer une amélioration. GitHub permet également de trouver des projets en fonctions de leurs objectifs. Certaines personnes de la communauté *open source* (Miles Bardon, Yann Robert) nous ont ainsi aidés, en particulier du côté de l'ingénierie logicielle et de l'expérience utilisateur (intégration continue avec Travis, gestion et automatisation de production des projets avec Maven puis Gradle, installateur Windows, tests unitaires, interface...) et nous ont permis d'améliorer notre efficacité. De même, nous recevons des commentaires réguliers de thérapeutes qui ont utilisé GazePlay avec des enfants en situation de polyhandicap que nous essayons d'intégrer au mieux.

Références

- [1] Narcisa CHIRVASIU and Elena SIMION-BLÂNDĂ. Alternative and augmentative communication in support of persons with language development retardation. *Revista Romaneasca pentru Educatie Multidimensională*, 10:28, 07 2018.
- [2] Collection expertise collective. *Handicaps rares. Contextes, enjeux et perspectives*. INSERM, 2013.
- [3] Mark B. Friedman, Gary Kiliany, and Mark Dzmura. The eyetracker communication system. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 3(3):250–252, 1982.
- [4] Joke J. Geytenbeek, Lidwine B. Mokkink, Dirk L. Knol, R. Jeroen Vermeulen, and Kim J. Oostrom. Reliability and validity of the c-billt : A new instrument to assess comprehension of spoken language in young children with cerebral palsy and complex communication needs. *Augmentative and Alternative Communication*, 30(3):252–266, 2014.

13. <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>.

- [5] E. Smeets R. Van de Berg M. Van den Berg Leopold M.G. Curfs Gillian S. Townend, Peter B. Marschik. Eye gaze technology as a form of augmentative and alternative communication for individuals with rett syndrome : Experiences of families in the netherlands. 28(1):101–112, 2016.
- [6] Nicola Grove and Margaret Walker. The makaton vocabulary : Using manual signs and graphic symbols to develop interpersonal communication. *Augmentative and Alternative Communication*, 6(1):15–28, 1990.
- [7] Robert J. K. Jacob. What you look at is what you get : Eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, pages 11–18, New York, NY, USA, 1990. ACM.
- [8] Francis Jambon and Vanda Luengo. Analyse oculométrique " on-line " avec zones d'intérêt dynamiques : application aux environnements d'apprentissage sur simulateur. In Frédéric Vanderhaegen Régis Mollard, Franck Poirier, editor, *Ergo'IHM 2012 - Conférence sur les nouvelles interactions, créativité et usages*, page publication en cours, Biarritz, France, October 2012. Session plénière Ergo/IHM/IS.
- [9] Émile Javal. *Physiologie de la lecture et de l'écriture*. Félix Alcan, 1905.
- [10] A. Kar and P. Corcoran. A review and analysis of eye-gaze estimation systems, algorithms and performance evaluation methods in consumer platforms. *IEEE Access*, 5:16495–16519, 2017.
- [11] R. Bates M. Donegan, P. Majaranta. *The Universal Access Handbook*, chapter 36, pages 1–20. CRC Press, 2009.
- [12] Van Bao Nguyen, Francis Jambon, and Gaëlle Calvary. Gaze-Based Interaction : Evaluation of Progressive Feedback. pages 153–158. ACM, October 2014. Poster.
- [13] Geneviève Petitpierre and Koviljka Barisnikov. *Le Vygotskij que nous (ne) connaissons (pas). Les principaux travaux de Vygotskij et la chronologie de leur composition*. Delachaux et Niestlé, 1 edition, 1 1994.
- [14] N. Bahi-Buisson M. Voisin Université Pierre et Marie Curie (Paris) UFR de médecine Pierre et Marie Curie S. Patachon, M. Duclos. Syndrome de rett : instauration d'une communication alternative par commande oculaire : étude de cas unique. 2015. OCLC: 927105157.
- [15] Dario D. Salvucci and Joseph H. Goldberg. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '00, pages 71–78, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [16] Didier Schwab, Amela Fejza, Loïc Vial, , and Yann Robert. The gazeplay project : Open and free eye-trackers games and a community for people with multiple disabilities. *Proceedings of 16th International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, july 2018.
- [17] Jeff Sigafos, Larah van der Meer, Ralf Schlosser, Giulio Lancioni, Mark O'Reilly, and Vanessa Green. *Augmentative and Alternative Communication (AAC) in Intellectual and Developmental Disabilities*, pages 255–285. 12 2016.
- [18] Benjamin W Tatler, Nicholas J Wade, Hoi Kwan, John M Findlay, and Boris M Velichkovsky. Yarbus, eye movements, and vision. *i-Perception*, 1(1):7–27, 2010.
- [19] Nicholas J Wade. Pioneers of eye movement research. *i-Perception*, 1(2):33–68, 2010. PMID: 23396982.
- [20] Nicholas J. Wade and Benjamin W. Tatler. Did javal measure eye movements during reading ? *Journal of Eye Movement Research*, 2(5), 2009.
- [21] A. L. Yarbus. *Eye Movements and Vision*. Plenum. New York., 1967.
- [22] Elisabeth Zucman and Jacqueline Spinga. *Les enfants atteints de handicaps associés : les multihandicapés : rapport d'un groupe d'étude du Centre technique national d'études et de recherches sur les handicaps et les inadaptations (France)*. CTNERHI, 1985.



De la réingénierie d'un *serious escape game* sur la société inclusive aux recherches en informatique

Mathieu Muratet^{1 2}, Melissa Arneton^{2 3}, Marie-Hélène Ferrand²,
Véronique Geffroy^{2 3}, Anne Vanbrugghe^{2 4}, Delia Garbarini^{1 2}

Introduction

Le rapport de l'OMS de 2011 estime que plus d'un milliard de personnes vivent avec un handicap (soit environ 15 % de la population). S'inscrivant dans une approche sociale du handicap, le rapport rappelle que la notion de handicap fait partie de la condition humaine, il indique que tout un chacun à un moment de sa vie sera confronté à une situation handicapante. En ratifiant la convention internationale des droits des personnes handicapées, plus de 150 pays se sont engagés depuis 2005 dans un changement sociétal majeur : le handicap n'est plus une caractéristique inhérente à un individu porteur d'une déficience ou d'un trouble mais il résulte d'entraves ou de limitations induites par la société. L'environnement social, technique ou humain n'offre pas la possibilité à tous et toutes de participer car des besoins spécifiques de communication ou d'action ne sont pas pris en compte. Plus que la promotion de valeurs humanistes, la ratification de la convention oblige les pays signataires à faire évoluer leurs systèmes juridiques, leurs pratiques institutionnelles et les comportements et représentations des acteurs professionnels pour mettre en œuvre une société

1. Sorbonne Université, CNRS, LIP6, F-75005 Paris, France

2. Université Paris Lumière, INSHEA, 92100 Suresnes, France

3. Grhapes (EA 7287)

4. Université Paris Lumière, Paris 8, SFL (UMR 7023), 93200 Saint Denis, France



respectueuse de chacun et chacune sans discrimination. Un changement de modèle est en cours dont les lois sont des indicateurs de transformation vers une société plus juste. Mais comment accompagner ce changement de modèle en formation ? Comment sensibiliser les citoyens à cette question de la société inclusive ?

Pour contribuer à répondre à ces questions, une équipe d'enseignants et de formateurs de l'INSHEA⁵ (Institut national supérieur sur le handicap et les enseignements adaptés) ont réaménagé un jeu existant de type escape game. Nous présentons dans cet article la genèse du projet ainsi que le travail de réingénierie opéré sur le jeu. Nous compléterons cette présentation en dégageant quelques problématiques de recherche en informatique en lien avec ce projet.

Du *Learning-Scape* à l'*E-LearningScape Access*

E-LearningScape Access est une adaptation du jeu *E-LearningScape* lui-même inspiré du *LearningScape* conçu par SAPIENS⁶ et le CRI⁷. La version originale consistait en un *escape game* grandeur nature traitant du thème de la pédagogie [1]. Dans cette version du jeu, les participants (en équipe de quatre) jouent le rôle de marchands de sable immergés dans le rêve de Camille, une jeune enseignante-rechercheuse à la veille de son premier enseignement. Leur défi consiste à aider Camille à structurer sa pensée durant son sommeil par la résolution d'énigmes sur le thème de la pédagogie. Bien que ce format grandeur nature soit particulièrement apprécié des participants, la contrainte principale de ce genre de jeu est le passage à l'échelle des trois salles réelles prévues. En effet, déplacer l'*escape game* et en créer des copies nécessite un investissement important en temps et en équipement. C'est dans ce contexte que *E-LearningScape* a été développé par Sorbonne Université à travers l'équipe MOCAH du LIP6⁸, le projet Play@SU et CAPSULE⁹.

E-LearningScape reprend le thème et l'atmosphère du jeu original mais le transforme en un jeu hybride mêlant réel et virtuel. Les concepteurs de ce jeu ont choisi de maintenir certains éléments du jeu dans le monde réel afin d'encourager la collaboration entre les joueurs. *E-LearningScape* peut donc être joué par deux à cinq joueurs autour d'un ordinateur. Les joueurs évoluent dans un univers virtuel, découvrent des fragments de rêve leur donnant accès à du matériel dans le monde réel. Ils résolvent alors des énigmes à l'intérieur et à l'extérieur du jeu vidéo, ces deux

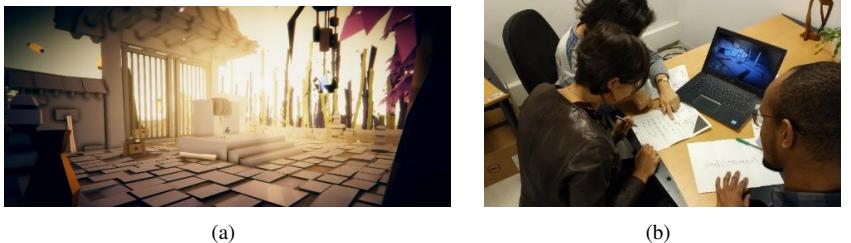
5. L'une des missions de l'INSHEA est la formation initiale et continue de professionnels afin qu'ils participent à la mise en œuvre d'une société plus équitable pour tous et toutes qu'ils soient ou non en situation de handicap et ce, à tous les âges de la vie et plus particulièrement dans le domaine de l'école et de la formation.

6. Service d'accompagnement aux pédagogies innovantes et à l'enseignement numérique de Sorbonne Paris Cité

7. Centre de recherche interdisciplinaire

8. Laboratoire d'informatique de Paris 6

9. Centre d'accompagnement pour la pédagogie et support à l'expérimentation



(a)

(b)

FIGURE 1. Images du jeu *E-LearningScape*

facettes s'alimentant mutuellement. Le jeu permet aussi, par la mise en situation, de faire un apprentissage réflexif sur différentes manières d'apprendre et de travailler ensemble.

Dans un troisième temps, le jeu a fait l'objet d'une seconde adaptation pour sensibiliser à l'accompagnement d'enfants ou d'adultes en situation de handicap par des professionnels : *E-LearningScape Access*. Les mécaniques des énigmes ont été conservées et les éléments textuels et visuels ont été modifiés pour traiter des questions relatives à la société inclusive. Les différentes versions d'*E-LearningScape* sont disponibles à l'adresse suivante <https://github.com/Mocahteam/E-LearningScape>.

Réingénierie du jeu pour une société inclusive

Le processus de réingénierie a impliqué sept enseignants et formateurs de l'INSHEA afin d'adapter le jeu *E-LearningScape*. L'objectif est de créer un support pédagogique interactif et engageant pour des joueurs entrant en formation ou se spécialisant sur la mise en œuvre d'une société moins exclusive. La scénarisation ainsi que le contenu des énigmes ont été retravaillés afin d'aborder la question de l'accessibilité, autrement dit la prise en compte par l'environnement notamment humain des besoins particuliers des individus confrontés à des situations de handicap. Le développement d'une société inclusive passe par l'adoption de pratiques non-discriminantes, vis-à-vis des personnes qui diffèrent des normes jusqu'à présent dominantes en terme de mobilité ou de fonctionnement intellectuel par exemple. Pour ce faire, quatre thématiques sont abordées dans ce développement du jeu : 1) être personne ressource pour les autres professionnels ; 2) rendre accessible des ressources ; 3) analyser/identifier les besoins et 4) adapter sa pratique pour répondre aux besoins.

Mobiliser un artefact informatique pour accompagner, améliorer voire augmenter les processus d'apprentissage et d'enseignement d'étudiants contribue à leur investissement dans les apprentissages [2,3]. En travaillant en équipe à résoudre

des énigmes, les apprenants sont amenés à rassembler les différentes aptitudes et connaissances de chaque membre de l'équipe, qu'il s'agisse de compétences dans l'usage du numérique (observer et se déplacer dans un environnement virtuel), dans l'appréhension d'une interface à plusieurs niveaux d'information (salle du jeu, gestion des onglets de ressources collectées par l'équipe, recours ou non aux aides automatiques...), mais aussi dans la planification et la résolution de problèmes. Cette version du jeu vise à utiliser les possibilités numériques dans une activité nécessitant de travailler en équipe à la réalisation d'un objectif commun : participer à l'accessibilité de la société pour tous et toutes. Elle doit conduire les joueurs à réfléchir à la possibilité pour eux d'être une personne ressource pour d'autres acteurs professionnels profanes sur ces questions.

Les contenus des énigmes recourent à des outils d'adaptations (braille, alphabet dactylographique, thermogonflage d'un labyrinthe...) afin de sensibiliser à la question de l'accessibilité des ressources. De manière générale, la charge cognitive sollicitée dans la résolution des épreuves renvoie à la question de l'attention et de la planification pour résoudre des tâches, éléments qui peuvent poser des difficultés à des individus présentant des troubles cognitifs par exemple. Face à la nécessité de planifier, le travail en équipe se présente alors comme un élément de mise en accessibilité au travers d'un partage des tâches entre les membres. D'autres énigmes confrontent, quant à elles, les joueurs aux entraves que l'environnement peut mettre en œuvre à la compréhension d'un contenu ou d'une tâche. Par exemple, une énigme se base sur la distorsion de lettres présentées en courbe, l'utilisation d'un miroir permet de refléter les éléments pertinents pour identifier le mot réponse de stigmatisation. Il s'agit alors de leur faire prendre conscience, de manière empirique, de la nécessité d'analyser et d'identifier les besoins spécifiques en présence pour concevoir des supports les plus inclusifs possibles.

En sus des apprentissages faits entre pairs selon une approche d'apprentissage tutoré, le jeu est l'occasion pour l'enseignant de faire une introduction moins formelle au thème des besoins particuliers et de l'accessibilité. Ainsi, l'une des premières énigmes à résoudre propose différentes désignations utilisées au cours de l'histoire contemporaine pour évoquer les personnes en situation de handicap (déficience, incapacité, désavantage, limitation...). Les réponses permettant de résoudre l'énigme (à savoir : fonctions / participation / capacité) renvoient au changement de paradigme socioconstructiviste du handicap qui met l'accent sur le fait qu'une situation de handicap résulte non pas des individus mais des entraves induites par l'environnement. Le débriefing qui suit directement la phase de jeu vise à faire prendre conscience aux joueurs des notions liées à l'accessibilité et à l'identification des besoins y compris dans une perspective historico-culturelle.

Enfin, la mobilisation d'une analyse didactique de l'activité [4] permet à chaque joueur de s'engager dans une activité métacognitive sur les différentes manières

d'apprendre et de travailler et sur les différentes voies possibles pour atteindre un même objectif final. Il s'agit d'un apport important du jeu au niveau individuel. La dimension expérientielle du jeu confronte chaque joueur à ses propres représentations et pratiques concernant le handicap. Ainsi, l'énigme dite des lunettes invite les joueurs à changer de regard. La récupération de différents éléments les amène à observer plusieurs individus au travers de deux verres de lunettes : l'un d'eux rend visibles les situations de handicap, l'autre filtre les handicaps visibles pour révéler les individus qui semblent sans entrave alors qu'ils en ont. Mises ensemble, la paire de lunettes donne à voir les individus comme une foule dont certains sont porteurs de handicap invisible au premier abord. Le jeu est l'occasion pour chaque joueur de réfléchir à comment adapter sa pratique et s'adapter à d'autres réalités ; une réflexion s'engage pour chacun par rapport aux membres de son équipe et par rapport aux autres équipes.

Problématiques de recherche sous-jacentes en informatique

Produire une ressource pédagogique sur le thème de la société inclusive et de l'accessibilité requiert qu'elle soit elle-même accessible. Or, cette question de l'accessibilité dans des environnements hautement interactifs, tels que les jeux vidéo pose de nombreux défis. Les jeux vidéo sont des environnements multimodaux qui demandent aux joueurs d'avoir des compétences sensorielles, mentales et motrices pour capter les stimuli produits par le jeu et fournir des réponses en retour à travers la maîtrise des périphériques d'entrée (manipuler une manette, un clavier, une souris, une interface tactile...) [5,6,7,8]. Le manque d'accessibilité d'un jeu peut être dû à la non perception des stimuli (en raison d'une déficience visuelle ou auditive par exemple) mais également à l'incapacité du joueur à analyser ces stimuli et à fournir une réponse en retour. Une surcharge de stimuli visuels et auditifs peut ainsi mettre en difficulté des joueurs ayant une déficience cognitive qui auront probablement des difficultés à trier l'information et à déterminer la réponse à fournir. Une déficience motrice, quant à elle, limitera le joueur dans la mise en œuvre de la réponse si elle se traduit par la manipulation des commandes de jeu, surtout si celle-ci doit être réalisée dans un temps limité.

L'approche *UA-Games* [9,5,10] consiste à concevoir des jeux vidéo universellement accessibles et renvoie aux recherches menées en EIAH¹⁰ sur les trois dimensions de l'adaptation [11] et les notions d'environnements adaptés, adaptables et adaptatifs. Les jeux adaptés visent un profil particulier de joueur et les modalités d'interaction seront donc fixées lors de la conception. L'environnement créant la situation de handicap, un jeu adapté pour une déficience particulière risque de générer en conséquence une inaccessibilité pour les autres joueurs. Le jeu *A blind Legend*¹¹

10. Environnements informatiques pour l'apprentissage humain

11. <http://www.ablindlegend.com/>

en est un exemple singulier. Ce jeu met le joueur dans la peau d'un personnage aveugle où le seul canal de communication utilisé est le son. Ce jeu est donc par nature inaccessible aux joueurs ayant un trouble de l'audition. Les jeux adaptables sont les plus répandus ; en effet, les jeux récents intègrent de plus en plus de menus permettant aux joueurs de personnaliser les modalités d'interaction à leur convenance (vitesse de déplacement du dispositif de pointage, couleurs/contrastes, touches/boutons de contrôle, choix de la difficulté...). Ces paramètres permettent donc à tous les joueurs d'adapter le jeu à leur convenance pour améliorer leur expérience de jeu. Les jeux adaptatifs sont quant à eux plus rares, car ils doivent intégrer un modèle du joueur ou de la résolution des défis proposés afin d'adapter automatiquement les interfaces ou les contenus aux difficultés rencontrées par les joueurs.

Dans le cadre du projet *E-LearningScape Access*, nous travaillons ces dimensions de l'adaptation selon deux problématiques : Comment intégrer de nouvelles mécaniques de jeu et modalités d'interaction non prévues initialement lors de la conception du jeu ? Comment fournir une aide en temps réel s'adaptant aux difficultés du joueur ?

L'architecture logicielle Entité-Composant-Système

Pour répondre à la première problématique, nous étudions les apports de l'architecture logicielle Entité-Composant-Système (ECS), architecture avec laquelle le jeu *E-LearningScape* a été développé. Historiquement, le développement de jeux vidéo repose majoritairement sur le paradigme de programmation orientée objet (POO) dont C#, C++ et Java sont les langages de programmation les plus utilisés. Néanmoins les principes inhérents à la POO tel que l'encapsulation, l'envoi de message et l'héritage peuvent rendre difficile la maintenance et l'évolutivité d'un moteur de jeu vidéo. Avec une approche orientée objet, les développeurs modélisent les éléments du jeu sous la forme de classes pouvant être spécialisées en sous-classes, etc. Le processus de développement des jeux vidéo étant hautement itératif, l'ajout de nouvelles mécaniques de jeu ou modalités d'interaction peut entraîner des modifications de la modélisation initialement envisagée. Ces modifications ont alors des impacts forts sur les développements et requièrent des phases de restructuration de code importantes, coûteuses en temps de développement et sources de bugs. La rigidité de l'arbre d'héritage est donc un frein dans ce contexte.

L'ECS utilise, quant à elle, une approche orientée données et s'articule autour de trois concepts [12,13]. Les entités (premier concept) représentent les objets du jeu mais ne contiennent ni données, ni méthodes. Une entité est une simple référence vers une collection de composants (deuxième concept) qui contiennent, eux, les données. Les composants décrivent les aspects d'une entité comme sa couleur, sa taille, sa vitesse, etc. Un composant peut-être ajouté ou supprimé dynamiquement à une entité. Enfin, les systèmes (troisième concept) définissent la logique de jeu.

Ils accèdent aux composants des entités afin de les traiter et les mettre à jour. Ils modifient ainsi les données du jeu et mettent en œuvre la simulation. ECS est une architecture logicielle où la simulation est dirigée par les données et se base sur la notion de composition, au contraire de l'approche orientée objet focalisée sur l'encapsulation et l'héritage.

L'ECS a été développée pour répondre à deux problématiques : améliorer la modularité des codes informatiques et améliorer les performances des moteurs de jeu. Concernant la modularité, l'approche dirigée par les données permet d'ajouter de nouvelles mécaniques de jeu ou modalités d'interaction avec un impact limité sur le code existant. Pour intégrer une nouvelle caractéristique, le développeur doit (1) définir les composants nécessaires au stockage des données, (2) ajouter ces composants aux entités concernées et (3) implémenter les systèmes qui traiteront ces composants. Ainsi, ajouter une nouvelle mécanique de jeu a un impact limité sur les codes existants. Du point de vue de la performance, l'ECS permet de contrôler l'organisation des données en mémoire et permet ainsi d'optimiser l'accès aux composants.

Nous cherchons donc à évaluer à travers *E-LearningScape Access* si les promesses de l'ECS en terme d'accessibilité permettent l'intégration de fonctionnalités d'accessibilité non anticipées lors de la conception du jeu et ce, avec un impact limité sur les codes existants.

Suivi de l'activité du joueur

La seconde problématique abordée dans le projet consiste à fournir des aides aux joueurs en fonction des difficultés rencontrées en cours de jeu. Cette problématique fait appel à des travaux sur l'analyse des traces et la modélisation des procédures de résolution. Nous exploitons le formalisme des réseaux de Petri pour modéliser les solutions expertes du jeu [14]. Nous entendons, par solutions expertes, les procédures prescrites par les concepteurs du jeu pour résoudre les différentes énigmes. Nous avons choisi d'exploiter les réseaux de Petri, car ils ont montré depuis longtemps leur capacité à modéliser des systèmes extrêmement complexes avec de grands espaces d'états, et notamment les jeux sérieux [15]. Le formalisme des réseaux de Petri s'appuie à la fois sur une théorie mathématique formelle rendant le modèle traitable par la machine et sur une représentation graphique lisible par des humains.

Bien que le formalisme des réseaux de Petri soit manipulable par un humain, modéliser la dynamique d'un jeu vidéo reste complexe à réaliser. Pour aider les concepteurs d'un jeu vidéo dans cette tâche, notre démarche consiste à demander aux concepteurs du jeu de créer à la main des réseaux de Petri simples. Un réseau de Petri simple représente un pattern de comportement générique qui peut être associé à une entité isolée sans se préoccuper des dépendances qu'elle peut avoir avec les autres entités. Les liens entre les différentes entités du jeu sont ensuite exprimés à

l'aide d'un langage spécifique et de relations logiques. Ces expressions sont ensuite analysées pour générer un réseau de Petri complet modélisant la simulation telle que décrite.

Le réseau de Petri ainsi produit est exploité et notamment son graphe de couverture pour vérifier différentes propriétés. Par exemple, nous vérifions si une action du joueur est réalisable dans la suite de la simulation, ou a déjà été réalisée, ou nous vérifions si le joueur s'est mis dans une situation où il ne pourra plus atteindre la fin du jeu. L'analyse de ces propriétés nous permet d'étiqueter chaque action du joueur avec des labels sémantiques qui sont ensuite exploités pour déterminer la meilleure aide à apporter au joueur au cours du jeu. Les premières expérimentations du jeu menées en ajoutant une aide en ligne indiquent une plus grande autonomisation des équipes dans la gestion du jeu, l'analyse des traces a posteriori devrait permettre d'aller plus loin dans l'investigation de l'apport d'un tel formalisme, en termes de mise en accessibilité d'un jeu vidéo.

Conclusion

La mise en œuvre d'une société inclusive invite à transformer les modèles de pensée qui doivent être accompagnés par des ressources elles-mêmes accessibles. *E-LearningScape Access* en est un exemple singulier. Le travail engagé de réingénierie pour adapter les contenus du jeu sur le thème de l'accessibilité et des besoins particuliers a soulevé en parallèle des questions de recherche en informatique. Ces questions portent sur des problématiques de génie logiciel – ou comment aider les développeurs à intégrer dans les outils numériques des fonctionnalités d'accessibilité qui n'avaient pas été anticipées au moment des différentes étapes de conception – et sur des problématiques d'EIAH - ou comment proposer des outils intelligents capables de proposer une aide en temps réel circonstanciée à l'activité de l'usager.

Bibliographie

- [1] V. Roger et M. Freudenthal, « Créer un escape game pédagogique », 10 Décembre 2019. Accessible à <https://sapiens-uspc.com/creer-un-escape-game-pedagogique-dossier-learningscape/>.
- [2] E. Sanchez, M. Ney et J.-M. Labat, « Jeux sérieux et pédagogie universitaire : de la conception à l'évaluation des apprentissages», Revue Internationale des technologies en pédagogie universitaire, vol. 8, n°11-2, pp. 48-57, 2011.
- [3] T. Carron, M. Muratet, B. Marne et A. Yessad, « Analyser et représenter la progression de la difficulté d'un jeu sérieux du point de vue ludique et pédagogique », dans Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Strasbourg, 2017.
- [4] V. Caraguel et K. Guiderdoni-Joudain, « Jeu sérieux à l'université : quels apports sur l'engagement des équipes ? », Carrefours de l'éducation, vol. 44, n°12, pp. 196-210, 2017.

- [5] D. Grammenos, A. Savidis et C. Stephanidis, « Designing Universally Accessible Games », ACM Computers in Entertainment, vol. 7, n° 11, p. Article 8 (29 pages), 2009.
- [6] R. McCrindle et D. Symons, « Audio space invaders », chez Third International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, 2000.
- [7] B. Yuan, E. Folmer et F. Harris, « Game accessibility : A survey », Universal Access in the Information Society, vol. 10, pp. 81-100, 2011.
- [8] IGDA, « Accessibility in Games : Motivations and Approaches », International Game Developers Association, 2004.
- [9] D. Grammenos, A. Savidis et C. Stephanidis, « Unified Design of Universally Accessible Games », chez Universal Access in Human-Computer Interaction, Beijing, 2007.
- [10] F. E. Garcia et V. P. de Almeida Neris, « A Data-Driven Entity-Component Approach to Develop Universally Accessible Games », Universal Access in Human-Computer Interaction, 2014.
- [11] K. Sehaba, « Adaptation dynamique des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain », Université Lumière, Lyon 2, 2014.
- [12] S. Bilas, « A Data-Driven GameObject System », chez Game Developers Conference, 2002.
- [13] B. Capdevila, « Serious game architecture and design : modular component-based data-driven entity system framework to support systemic modeling and design in agile serious game developments », Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2013.
- [14] L. L. Peterson, Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Prentice Hall, 1981.
- [15] M. Araújo et L. Roque, « Modeling Games with Petri Nets », chez Digital Games Research Association, 2009.



Simulateur pour l'apprentissage de la conduite en fauteuil roulant électrique pour des enfants polyhandicapés

Nancy Rodriguez¹

La réalité virtuelle est, depuis des nombreuses années, largement utilisée dans le domaine de l'entraînement. En effet, avec la réalité virtuelle il est possible de recréer et expérimenter une situation particulière tout en gardant le contrôle sur le déroulement des actions. Les environnements virtuels sont donc des outils d'apprentissage hautement disponibles, sans risques et permettant à l'utilisateur de progresser à son propre rythme. En répétant ses actions jusqu'à l'obtention d'une certaine assurance, le passage vers la situation et l'équipement réel est facilité. Dans cet article, nous présentons nos travaux en cours concernant le développement d'un simulateur d'apprentissage de la conduite d'un fauteuil roulant électrique, permettant à des enfants atteints de polyhandicap de se familiariser avec le fauteuil, de comprendre son fonctionnement et de se préparer à le conduire, un grand pas dans l'acquisition de leur autonomie.

Introduction

La réalité virtuelle, depuis ses débuts, a trouvé dans l'entraînement un domaine d'application parfaitement adapté. En effet, la réalité virtuelle est flexible, sans risque [7], et permet le développement d'habiletés spécifiques et l'évolution en autonomie. La simulation est sécurisante, elle permet de tester les conséquences des certaines actions sans qu'il y ait de conséquence dans le monde réel. Il est

1. Université de Montpellier, LIRMM.



également possible d'agrandir le panel de situations possibles et de les adapter aux différents utilisateurs en fonction de l'entraînement que l'on veut effectuer [4]. En outre, l'environnement numérique permet d'évaluer facilement et quantitativement les progrès de l'utilisateur et ses points faibles [11].

L'objectif du travail que nous présentons dans cet article est la réalisation d'un simulateur de fauteuil électrique pour des enfants atteints de polyhandicap, âgés de 13 à 16 ans environ. Ce simulateur devra les préparer, sur les aspects moteurs et cognitifs, à l'utilisation du fauteuil réel. L'apprentissage de la conduite d'un fauteuil roulant électrique est long et difficile alors qu'il est nécessaire afin de bénéficier d'une certaine autonomie indispensable pour le développement mental de l'enfant polyhandicapé. Le polyhandicap est un handicap grave à expression multiple, associant déficience motrice et déficience mentale sévère ou profonde, entraînant une restriction extrême de l'autonomie et des possibilités de perception, d'expression et de relation [2].

L'apprentissage de l'utilisation du fauteuil en conditions réelles peut être dangereux, éprouvant voir effrayant pour les utilisateurs ; ce qui peut amener à des blocages de leur part et ralentir fortement cette étape cruciale dans leur développement. L'utilisation d'un système virtuel pourrait aussi leur permettre d'utiliser un fauteuil roulant électrique plus tôt grâce à une habituation aux émotions que provoque son utilisation. De plus, la maniabilité de ces appareils n'est pas intuitive et demande de la pratique, en particulier pour les patients atteints de dysfonctionnements moteurs graves les empêchant d'utiliser les périphériques conventionnels comme le *joystick*. Un simulateur pourrait permettre de trouver quels sont les périphériques adaptés à chaque individu et lui apprendre à les utiliser sans prendre aucun risque.

Ce projet prend place dans une collaboration entre l'EEAP (Établissements et services pour enfants et adolescents polyhandicapés) Coste Rousse et le laboratoire d'informatique, de robotique et de micro-électronique de Montpellier (LIRMM). Nous travaillons en étroite collaboration avec l'équipe multidisciplinaire (éducateurs spécialisés, orthoptiste, kinésithérapeute) de Coste Rousse pour rendre le simulateur accessible dès sa conception. En effet, les enfants souffrant de handicaps multiples ont besoin de soutien dans les principales activités de la vie, d'un enseignement spécialisé en raison de capacités de communication limitées, d'une tendance à oublier les compétences en cas de non-utilisation, d'une grande sensibilité à l'échec et de difficultés à généraliser les compétences d'une situation à l'autre.

Dans ce document nous présenterons une revue de quelques simulateurs de fauteuil roulant. Nous détaillerons ensuite le simulateur avec les choix faits concernant les indices visuels et les périphériques d'interaction. Nous finirons par une discussion concernant l'évaluation du système et le travail futur.



FIGURE 1. (a) ACCESSIM, un simulateur pour l'architecture, (b) VIEW, un simulateur pour l'apprentissage.

État de l'art

Les simulateurs de fauteuil roulant électrique

De nombreux simulateurs de fauteuil roulant électrique existent dont certains conçus pour apprendre à construire le fauteuil et d'autres pour comprendre les difficultés d'utilisation d'un fauteuil et évaluer les constructions en conséquence. Mais il n'existe pas, à notre connaissance, de simulateurs conçus ou adaptables pour des enfants ou des adultes atteints de polyhandicap. Par exemple, les systèmes ACCESSIM (un simulateur pour l'architecture, voir figure 1(a)) [12] et VIEW (un simulateur pour l'apprentissage, voir figure 1(b)) [8], présentent des décors réalistes avec de nombreux détails et animations. Ce type de scène n'est pas adaptée à des enfants souffrant de troubles cognitifs. En effet, les détails permettant d'augmenter le réalisme et l'immersion de l'utilisateur provoqueront ici des difficultés de perception et de compréhension de l'environnement.

Crespo présente dans [6] un prototype de fauteuil roulant permettant de faciliter l'apprentissage de la conduite, en particulier pour les handicapés mentaux. Ce fauteuil est composé d'un joystick à retour de force et de capteurs pour détecter les collisions. Le prototype est capable d'éviter les murs ou autres obstacles pour assister le déplacement. Avant l'utilisation du fauteuil, une phase d'apprentissage via la réalité virtuelle et l'utilisation de périphériques à retour d'effort a été mise en place. Cela permet à l'utilisateur de s'entraîner et de s'habituer au retour d'effort encadrant ses mouvements. Dans le travail de Steyn [14], le simulateur utilise une interface en réalité virtuelle affichée sur quatre écrans et une plateforme physique sur laquelle repose le fauteuil (à retour d'effort). On cherche l'immersion totale de l'utilisateur pour qu'il agisse comme dans le monde réel. Cela permet, en plus de l'entraînement,

d'évaluer les fauteuils et l'accessibilité des endroits où celui-ci se déplace. Plusieurs périphériques peuvent être utilisés pour la commande du fauteuil comme un *joystick* ou, plus complexe, un casque doté de capteurs EEG. Le simulateur ACCESSIM [12] utilise une représentation très réaliste des milieux urbains pour sensibiliser les architectes et décideurs sur les difficultés rencontrées en fauteuil roulant. Il est également utilisé pour effectuer un début d'apprentissage à la conduite du fauteuil. Le simulateur fonctionne à l'aide d'une interface en réalité virtuelle reliée à un fauteuil disposant d'un *joystick* pour déplacer le fauteuil virtuel et d'une plateforme à retour d'effort permettant de l'incliner.

Le simulateur VIEW [8] dispose d'une interface en réalité virtuelle et le fauteuil virtuel est dirigé à l'aide d'un *joystick* classique de fauteuil roulant électrique (figure 1(b)). Il est possible de visualiser l'environnement virtuel à l'aide d'un écran classique ou d'un casque avec suivi des mouvements de la tête. Plusieurs parcours sont disponibles pour entraîner l'utilisateur sur des situations difficiles et demande de relever un défi, ce qui donne un côté ludique à l'apprentissage. Il permet également d'utiliser différents modèles de fauteuil électrique. Le système WheelSim propose aussi plusieurs niveaux demandant à l'utilisateur d'effectuer un parcours en circuit. La durée de chaque tour est comptabilisée ainsi que le temps passé en dehors du trajet pour un classement affiché en fin de partie. À noter qu'un travail très important a été réalisé sur l'environnement sonore. Les bruitages sont réalistes ce qui amplifie l'immersion.

Virtuel et apprentissage

Ces dernières années, nous avons pu observer une démocratisation des simulateurs et des jeux sérieux dans notre société que ce soit dans le monde professionnel ou de l'éducation. En effet, le virtuel offre une nouvelle manière d'approcher l'entraînement et l'apprentissage en évitant de prendre des risques [7]. Les environnements numériques, en particulier les jeux vidéo, sont de plus en plus utilisés par les enfants et ceci dès leur plus jeune âge. De plus, il a été prouvé que ceci pouvait être un élément important de leur développement [10].

On notera aussi que le virtuel a de nombreux avantages comparé à l'apprentissage classique. Tout d'abord, la simulation permet de ne prendre aucun risque, ce qui permet de tester les conséquences des actes sans aucune séquelle dans le monde réel. Ensuite, ceci permet d'agrandir le panel de situations possibles et de les adapter aux différents utilisateurs en fonction de l'entraînement que l'on veut effectuer [4]. Pour terminer, ceci permet d'évaluer facilement et quantitativement les progrès de l'utilisateur et ses points faibles [11].

Que ce soit dans la simulation ou le jeu sérieux, deux approches distinctes sont possibles. La première est de créer un outil proche de l'activité réelle comme la cuisine virtuelle développée par l'équipe de Mario Martinez-Zarzuela pour s'entraîner à réutiliser une cuisine afin de rééduquer les tâches quotidiennes à des personnes

souffrant de troubles psychomoteurs [15]. Dans la seconde approche, l'environnement virtuel n'aura pas forcément de rapport avec l'activité réelle mais permettra tout de même de s'entraîner à l'image du jeu sérieux *Hammer and Planks* développé par NaturalPad pour aider à la rééducation suite à un accident vasculaire cérébral (AVC) [9]. Ces deux méthodes ont chacune leurs avantages et inconvénients. La première aura tendance à favoriser le réalisme et l'immersion de l'utilisateur alors que la seconde mettra en avant le côté ludique afin de motiver les utilisateurs à s'entraîner avec le logiciel. On remarquera que, dans notre cas, les utilisateurs n'ont pas la même définition du ludique qu'un adolescent ou qu'un adulte mais plutôt celle d'un jeune enfant.

Les périphériques alternatifs de communications

Les périphériques alternatifs de communication sont des outils qui permettent d'améliorer les capacités à communiquer de personnes ne pouvant pas utiliser les moyens classiques. Nous allons nous intéresser aux périphériques permettant de communiquer avec un système informatique. De nombreux périphériques alternatifs existent sur le marché et s'adressent aux différents problèmes moteurs et cognitifs.

Un handicap mental demande des outils intuitifs et simples à utiliser. On aura donc tendance à vouloir utiliser les mouvements du corps de l'individu afin de briser la barrière périphérique et faire plus facilement le lien entre le réel et le virtuel [13]. Ceci est possible avec, par exemple, la *Kinect* de Microsoft qui est d'ailleurs déjà utilisée dans le domaine de la rééducation [15, 9].

Cependant, dans le cas de notre projet, les enfants souffrent aussi de handicap moteur plus ou moins sévère. Dans ce genre de situation, il est généralement envisagé d'utiliser des systèmes basés sur la reconnaissance vocale. Ce procédé fonctionne assez bien (cf. la plateforme de communication alternative–PCA [3]). Cet outil permet à des personnes ne pouvant pas utiliser de clavier, de pouvoir écrire des messages avec une intelligence artificielle aidant à compléter et corriger les messages. Malheureusement, dans le cas du polyhandicap, les enfants ne peuvent pas communiquer verbalement.



FIGURE 2. Exemple d'un contacteur

À ce jour, plusieurs dispositifs sont utilisés dans l'établissement Coste Rousse. Le premier est un synthétiseur de voix baptisé *Locutus*. Ce système permet aux enfants de communiquer à l'aide de pictogrammes soigneusement sélectionnés. Ce genre de dispositif est présent sur le marché mais leur avantage principal est d'être très fourni en mots et expressions, ce qui rend le logiciel difficilement compréhensible par nos utilisateurs. L'autre est un système permettant de diriger un fauteuil roulant électrique à l'aide d'un contacteur (voir figure 2) combiné à un système de défilement (haut, bas, gauche, droite). Certaines personnes vont être dans l'incapacité d'effectuer le moindre mouvement mais pourront généralement au moins activer quelques muscles. En plaçant des capteurs sur au moins quatre muscles, il est possible d'effectuer un mouvement sur un espace en deux dimensions, chacun des muscles représentant une direction [5]. Ces systèmes restent très peu utilisés car encombrants, complexes et mal adaptés aux différentes difficultés physiques que peuvent avoir les personnes souffrant de polyhandicap.

Le simulateur

L'élément central de l'étape du projet concerné par le stage est le fauteuil virtuel (cf. figure 3). Il est l'unique objet manipulé par l'utilisateur et le but est que son comportement soit assez proche du comportement d'un fauteuil réel pour qu'il y ait une habitation et un réel apprentissage de la conduite. Tous les choix concernant les aspects visuels et sonores, les différents niveaux, la *gamification* (renforcement positif) et les tests ont été réalisés en concertation avec l'équipe de Coste Rousse dans une démarche collaborative et itérative. Le praticien commence une partie avec le



FIGURE 3. Le fauteuil virtuel

profil de l'utilisateur et choisit l'environnement, le but, la vitesse du fauteuil roulant et le dispositif d'interaction. Les paramètres peuvent être modifiés sans redémarrer la session. Si l'enfant utilise un contacteur ou un oculomètre, des flèches de direction dans l'interface lui permettent de conduire le fauteuil roulant en touchant le bouton fléché souhaité. Il est également possible d'attendre que le bouton souhaité soit mis en surbrillance puis d'appuyer sur le contacteur.

Le simulateur est développé sous Unity3D, un moteur de jeux permettant de créer et de gérer des univers en trois dimensions interactifs. Ce logiciel permet de créer rapidement et facilement des prototypes de qualité en réalité virtuelle à l'aide de



FIGURE 4. (a) L'intérieur et (b) l'extérieur.

nombreuses fonctionnalités préprogrammées et d'une interface ergonomique et intuitive. Il permet, entre autres, de gérer la physique de tous les objets d'une scène, de les animer et d'utiliser de nombreux périphériques d'entrée et sortie.

Nous avons utilisé, pour un prototypage rapide, un modèle prédefini de simulation de roues de voiture. Cet outil de simulation possède quatre roues indépendantes, ce qui permet de simuler le comportement des roues de divers modèles de fauteuils réels. Bien évidemment, nous avons également expérimenté le comportement d'un fauteuil en l'utilisant afin de ressentir et de comprendre les sensations que provoque son utilisation. Nous avons ensuite défini la correspondance entre les différents mouvements des roues et les valeurs du *joystick* afin de reproduire au mieux dans le simulateur le comportement du fauteuil. Par exemple, sur un fauteuil à propulsion les deux roues arrières sont motrices et si nous mettons le *joystick* entièrement à droite alors le fauteuil pivote avec les deux roues tournant à même vitesse mais dans le sens contraire (la roue gauche vers l'avant et la roue droite vers l'arrière).

L'aspect visuel

Étant donné les troubles cognitifs des enfants polyhandicapés, il est indispensable de construire un outil qui leur soit adapté visuellement. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, d'identifier les éléments et les codes qui vont permettre de véhiculer l'information importante de la simulation.

Comme nous avons pu le voir dans l'étude de l'existant, les environnements sont généralement très réalistes, les détails permettant d'amplifier l'immersion de l'utilisateur. Dans notre cas, cette approche n'a pas de sens. En effet, l'accumulation d'éléments dans une scène aura plutôt tendance à gêner l'utilisateur et l'empêchera de correctement analyser les éléments importants de la scène.

Nous avons donc choisi de travailler sur des environnements très épurés en ne gardant que les éléments nécessaires. Les couleurs ont, elles aussi, été adaptées de manière à être suffisamment contrastées pour faire ressortir les objets importants et augmenter leur visibilité [1]. Il y a deux types de niveau : les niveaux en intérieur et ceux en extérieur (voir figure 4). En intérieur, nous avons tenté de reproduire l'aspect



FIGURE 5. Exemple d'objet adapté

de l'établissement Coste Rousse tout en épurant les éléments gênants. Les murs sont texturés à partir de photos de murs de l'établissement afin de faire comprendre aux enfants qu'ils sont en intérieur mais le carrelage et le plafond ont été épurés afin de pouvoir soulager la vision ainsi que d'afficher un parcours sur le sol qui soit clairement identifiable. En extérieur, le même procédé a été utilisé pour les murs mais nous avons opté pour un ciel visible très dégagé afin d'indiquer à l'utilisateur qu'il est en extérieur tout en limitant la charge visuelle. Les objets ont eux aussi été retravaillés afin d'avoir des couleurs plus contrastées et des éléments permettant une analyse rapide de l'objet par les enfants (voir figure 5).

Le simulateur propose plusieurs niveaux, avec leurs particularités mais construits de manière à travailler sur un point précis de l'apprentissage (par exemple le passage de portes) de la conduite en fauteuil roulant électrique. L'enchaînement des niveaux permet un entraînement progressif en respectant les étapes utilisées dans la procédure avec un fauteuil réel. Un système de parcours au sol est présent dans chaque niveau afin de permettre à l'utilisateur de s'orienter. Lorsque l'utilisateur comprend qu'il doit suivre le parcours, il devient possible de lui offrir des parcours d'obstacles, plusieurs parcours par niveau ou même des parcours personnalisés. Ceci nous a permis de créer des niveaux plus ouverts et plus réalistes sans que les enfants perdent leur concentration. De plus, nous avons également conçu et implémenté un éditeur de scène, permettant la création de nouveaux environnements à utiliser dans le simulateur.

Le visuel est aussi un très bon moyen pour donner des indices, par exemple, les portes sont accompagnées d'un système de damiers clignotants sur la porte à franchir afin d'améliorer sa visibilité. Il est utilisé également pour du *feedback*, comme le mouvement du *joystick* du fauteuil virtuel en fonction du périphérique réel. Dans le cadre du renforcement positif, nous avons décidé de récompenser le joueur lorsqu'il est sur la bonne voie avec un système peu intrusif à l'aide d'un *smiley* présent dans Coste Rousse et d'un feu d'artifice coloré à la fin de chaque niveau, qui lui est plus intrusif, mais le niveau étant terminé, la distraction de l'enfant n'est plus un souci (voir figure 6).

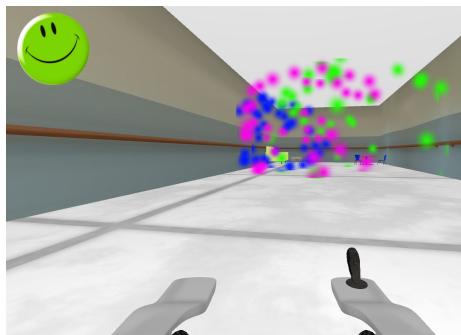


FIGURE 6. Les récompenses

L'aspect sonore

Le son est un élément généralement fortement compréhensible mais aussi dis-trayant pour les enfants souffrant de polyhandicap. Il est donc important de l'utiliser mais avec parcimonie. Nous avons donc choisi de l'utiliser pour faire passer des *feedbacks* essentiels, nous avons un son de clic à chaque démarrage du moteur afin de faire comprendre à l'utilisateur qu'il amorce un mouvement et nous avons un son d'applaudissement accompagnant les feux d'artifice à chaque niveau dans un but d'amélioration de la récompense de fin de niveau.

Les périphériques d'interaction

Un des objectifs à long terme de notre projet est le développement d'une brique logicielle permettant d'intégrer rapidement divers périphériques d'interaction car notre groupe d'utilisateurs est composé de personnes souffrant de difficultés motrices, mentales et cognitives qui seront différentes d'un individu à l'autre.

Les technologies d'interaction évoluent très rapidement, elles sont désormais plus largement disponibles et abordables, y compris le toucher et les gestes, par exemple le mouvement de balayage (*swipe*) utilisé dans les smartphones ou les tablettes, qui a transformé la façon dont nous interagissons avec les appareils. Mais ces techniques sont généralement conçues pour un profil standard », laissant derrière des personnes avec des déficiences motrices ou cognitives et accentuant encore le fossé numérique. En effet, les personnes atteintes de dysfonctionnement moteur sévère peuvent avoir des muscles trop faibles pour porter un appareil, ou une motricité pas assez fine, des difficultés à lever un bras et à garder la pose, ou de très légères différences entre les mouvements volontaires et involontaires. Si nous ajoutons des troubles cognitifs, il est clair que nous devons fournir des interfaces adaptées pour prendre en compte tous nos utilisateurs. La souris ou les *joysticks* traditionnels ne sont pas adaptés en raison de troubles moteurs. Nous avons donc ajouté la prise en charge des *joysticks* adaptés

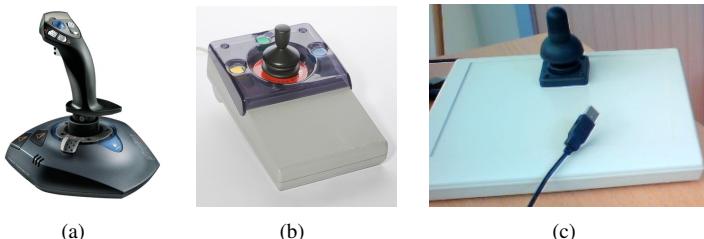


FIGURE 7. *Joysticks* (a) Logitech Wingman Force 3D (b) Esterline et (c) de fauteuil roulant.

(*joysticks* d'un fauteuil roulant adaptés pour être connectés à l'ordinateur via un port USB), des contacteurs et des *oculomètres*. Cela permet d'adresser des capacités de communication variées afin d'avoir une simulation accessible, et d'aider à trouver quels dispositifs conviennent le mieux à un utilisateur particulier.

Par exemple, dans un premier temps, nous avons travaillé avec un *joystick* à retour d'effort, le *WingMan Force 3D* de *Logitech* (cf. figure 7(a)) dans l'optique d'utiliser les avantages du retour d'effort dans l'apprentissage. À la suite d'une phase de test avec des enfants de Coste Rousse, nous avons été confrontés à une impossibilité totale d'utilisation de ce périphérique. En effet, ce *joystick*, étant un contrôleur de jeu, possède plusieurs boutons rendant très difficile la correspondance entre notre *joystick* et celui du fauteuil roulant. De plus, les boutons sont une source de distraction pour nos utilisateurs. D'autre part, le manche est très imposant, étant prévu pour une main d'adulte sans handicap moteur : il nécessite une force trop élevée et constante pour être contrôlé par nos utilisateurs.

Nous nous sommes donc tournés vers un autre périphérique, le *joystick* Esterline (voir figure 7(b)). Il permet de déplacer le curseur de la souris à l'aide d'un petit *joystick* conçu pour des personnes dans l'incapacité d'utiliser une souris d'ordinateur classique. Le défaut de ce périphérique est qu'il n'envoie ses données que sous forme de signaux souris et non pas en signaux de contrôleur de jeu comme un *joystick* classique. Les données reçues par l'ordinateur ne sont donc pas précises et sont surtout très fluctuantes, ce qui réduit fortement la qualité d'utilisation du simulateur.

Nous avons donc décidé de nous appuyer sur les connaissances d'un électronicien collaborateur de Coste Rousse pour créer notre propre *joystick* en combinant un *joystick* inutilisé de fauteuil roulant électrique et le circuit imprimé d'un *joystick* de jeu permettant de traduire les données analogiques (comprises entre 0 et 5 volts) du *joystick* de fauteuil roulant en données numériques flottantes (comprises entre -1 et 1) transmises à l'ordinateur via un port USB 2.0 (voir figure 7(c)). Cette solution a

permis aux enfants de réussir à contrôler le fauteuil virtuel sans être distraits par le dispositif d'interaction.

Les options

Étant donné que le handicap de chaque utilisateur est différent, il est nécessaire de disposer d'éléments modulables dans le simulateur afin de pouvoir adapter l'outil aux capacités et compétences de l'utilisateur. Le tableau ci-dessous montre les différentes options qui ont été mises en place. Toutes les options sont modifiables dans le menu de démarrage ou en cours d'utilisation à l'aide de raccourcis clavier.

nom de l'option	description
Vitesse	Modifie la limite maximale de vitesse
Saccades	Ajoute des saccades dans le comportement du fauteuil pour plus de réalisme mais aussi plus de difficultés
Zone morte	Zone du <i>joystick</i> dans laquelle le véhicule est à l'arrêt
Zone parfaite	Zone du <i>joystick</i> dans laquelle le <i>joystick</i> est considéré comme parfaitement sur les axes x ou y
Diagonales	Permet d'activer ou de désactiver les diagonales du <i>joystick</i>
Damiers portes	Permet d'ajouter des textures de damiers noirs et blancs autour des portes
Rayures murs	Permet de modifier la texture des murs en rayures noires blanches
Rayures cônes	Permet de modifier la texture des cônes en rayures noires blanches
Personnages non-jouables	Ajoute des personnages se déplaçant dans le niveau et faisant des obstacles supplémentaires en mouvement permanent
Périphérique	Permet de modifier le type de périphérique que l'on souhaite utiliser

Les options Zone morte et Parfaite, permettant de modifier l'expérience d'utilisation du périphérique, vont être particulièrement utiles lors de tests de périphériques alternatifs. Ceci les rend plus facile à utiliser ; ce qui permet d'effectuer un apprentissage progressif. Les options visuelles (Damiers et Rayures) vont permettre d'adapter le simulateur dans le but de canaliser le regard des utilisateurs vers les objectifs afin de les aider à se repérer dans l'environnement 3D. D'autres options, comme les personnages non-jouables, la vitesse ou le taux de saccades, vont permettre de modifier la difficulté et d'augmenter progressivement le réalisme.

Résultats

Dans ce projet, les utilisateurs cibles ont d'extrêmes difficultés de communication, leur niveau d'expression verbale et même gestuelle est très bas. Mais des études et les expériences dans les centres éducatifs comme Coste Rousse mettent en évidence

le fait que les enfants sont capables de s'exprimer et d'apprendre lorsqu'ils disposent d'outils adéquats. Un point important à signaler est qu'il est impossible de faire tester le simulateur au fur et à mesure de son avancement à cause des difficultés de reconnaissance visuelle et les frustrations que peut provoquer l'échec d'utilisation d'un prototype peu avancé. De plus, le polyhandicap limite la durée des séances à environ dix minutes maximum. Les séances sont définies dans le programme d'apprentissage de l'enfant défini en début d'année mais elles peuvent être annulées si l'enfant n'est pas en assez bonne forme. En travaillant avec l'équipe Coste Rousse et un groupe restreint d'enfants, nous avons réussi à obtenir des pistes pour améliorer notre travail et proposer un outil utilisable par les enfants atteints de polyhandicap même si le développement et l'évaluation de notre système progressent lentement.

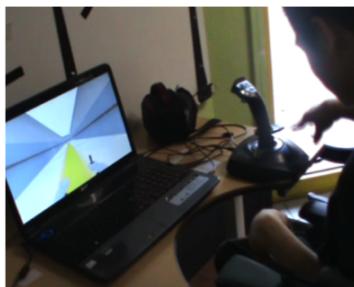


FIGURE 8. Interaction via le joystick Wingman

Lors de diverses séances de tests, nous avons pu observer beaucoup de curiosité concernant le simulateur mais différentes manières de l'aborder. Certains enfants étaient concentrés sur l'écran et le joystick alors que d'autres avaient tendance à être plus facilement distraits, parfois par notre présence. Nous avons néanmoins réussi à avoir des retours sur la reconnaissance d'objets de l'environnement virtuel lorsque le véhicule est à l'arrêt. En revanche, la reconnaissance est plus difficile en mouvement. Les enfants ont réussi à faire fonctionner le simulateur pendant un moment (2-3 minutes). Mais au bout de ces quelques instants, nous avons observé des difficultés dans l'utilisation des périphériques et les utilisateurs ont souhaité arrêter, principalement lorsque le joystick est utilisé.

Afin d'éviter une observation directe et faciliter l'analyse des sessions, nous avons développé un outil d'enregistrement des sessions pour pouvoir rejouer et suivre les actions de l'utilisateur. L'analyse du mouvement de la caméra virtuelle permet de savoir si les éléments importants de l'environnement sont perçus. En effet, les couleurs des boutons de direction n'étaient pas assez attrayantes pour les enfants qui les regardaient rarement. En détectant la perte de la trace du regard, il est possible de savoir si certaines distractions de l'extérieur ont altéré la concentration de l'enfant.



FIGURE 9. Visualisation des trajectoires

Enfin, une visualisation du chemin de l'utilisateur nous permet de voir s'il est cohérent avec le chemin prédefini ou si l'utilisateur choisit de suivre une voie différente (cf. figure 9).

Au niveau de l'équipe de Coste Rousse, les résultats sont positifs. L'utilisation de la conception participative nous a permis d'arriver à un prototype fonctionnel et accessible. Cette collaboration nous a permis de mettre en commun les compétences des différents acteurs du projet et de les faire participer activement à son élaboration. Ceci a permis de créer une réelle dynamique autour du projet et un désir de le faire évoluer. De plus, lors de journées portes ouvertes de Coste Rousse, nous avons présenté le projet à tous les enfants du centre ainsi qu'à leurs familles. Il est intéressant de remarquer qu'un enfant ayant eu un échec lors d'une séance de tests a souhaité réessayer le simulateur à cette occasion. Outre le fait qu'il ait réussi à utiliser le simulateur sans aide extérieure cette fois-ci, nous avons pu observer un désir d'utiliser ce système et même une certaine satisfaction, ce qui est très encourageant. Il sera donc sûrement possible à l'avenir d'étendre le projet à d'autres établissements et d'élargir le public cible.

Conclusion

Nous avons développé un simulateur de fauteuil roulant électrique adapté aux enfants polyhandicapés. Nous avons pu expérimenter avec un public (7 enfants) atteint de forts troubles cognitifs et observer qu'il est possible d'ajouter la réalité virtuelle dans leur projet d'apprentissage.

Un défi très important est l'évaluation de notre système afin de savoir si les compétences sont développées et si elles seront transférées dans le monde réel. En effet, nos utilisateurs ont des difficultés de communication extrêmes, leurs niveaux d'expression verbale et leur efficacité motrice sont très faibles. Nous ne pouvons donc pas utiliser les évaluations traditionnelles basées sur des questionnaires pour faire une évaluation de l'expérience par les sujets eux-mêmes. De plus il est déconseillé d'être présents pour observer les utilisateurs. Le système d'enregistrement proposé

nous fournira alors des informations utiles sur les éléments jugés « importants » par les enfants et leurs stratégies de recherche visuelle et d’interaction, qui nous permettront d’évaluer et améliorer notre système.

Références

- [1] A. Arditi. *Designing for people with partial sight and color deficiencies*, 2005.
- [2] M. Arpaillance and A. Debril. *Evaluer la communication de la personne polyhandicapée*, 2013.
- [3] P. Blache and S. Rauzy. *La pca : une plateforme de communication alternative*. *Entretiens de l ?Institut Garches*, 2004.
- [4] D. Le Gall and P. Allain. *Applications des techniques de réalité virtuelle à la neuropsychologie clinique*. *Champ psychosomatique*, no 22, p. 25-38, 2001.
- [5] C. Pinheiro Jr, E. Naves, P. Pino, E. Lossan, A. Andrade, and G. Bourhis. *Alternative communication systems for people with severe motor disabilities : a survey*. *BioMedical Engineering OnLine*, 2011.
- [6] L. Marchal-Crespo. *A simulator and assist-as-needed control strategy for learning to drive a power wheelchair*. PhD thesis, University of California, Irvine, 2006.
- [7] D. Mellet-d’Huart and G. Michel. *Les environnements Informatiques pour l’Apprentissage Humain*, chapter 11, "Réalité virtuelle et apprentissage". Hermes, 2006.
- [8] Y. Morere. *View : Virtual electric wheelchair*, 2012.
- [9] Naturalpad. *Hammer and planks*, 2013.
- [10] C.1 K. Olson. *Childrens motivations for video game play in the context of normal development*. *Review of General Psychology*, 2010.
- [11] M. Sahnoun. *Conception et simulation d'une commande à retour d'effort pour fauteuil roulant électrique*. PhD thesis, Université de Metz, France, 2007.
- [12] A. Schmid and C. Dumas. *Accessim*, 2008-2013.
- [13] C. Stephanidis and M. Sfyarakis. *Telecommunications for all*, chapter 4.9. 1996.
- [14] N. Steyn. *Virtual Reality Platform Modelling and Design for Versatile Electric Wheelchair Simulation in an Enabled Environment*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Tshwane University of Technology, 2014.
- [15] M. Martinez Zarzuela, F. J. Diaz Pernas, A. Alonso Garcia, D. Gonzalez Ortega, and M. Anton Rodriguez. *Cocina virtual para ayudar en la rehabilitación de personas con lesiones cerebrales mediante entrenamiento en una actividad cotidiana*. *RevistaSalud.com*, 9(35), 2013.

DU CÔTÉ DES ASSOCIATIONS



Association francophone de recherche d'information et applications¹

Objectifs. — *L'ARIA est une société savante, association loi 1901, ayant pour but de promouvoir le savoir et les connaissances du domaine de la recherche d'information (RI) et des divers domaines scientifiques en jeu dans la conception, la réalisation et l'évaluation des systèmes de recherche d'information.*

CORIA (Conférence recherche d'information et applications). — L'ARIA organise une conférence pour structurer la communauté française de recherche d'information. Certaines années, cette conférence est co-organisée avec d'autres associations dont les thèmes sont connexes (CIFED – écrit et document, TALN - traitement automatique du langage naturel) ou avec des associations similaires d'autres pays (Italie, Espagne). L'ARIA offre des bourses pour permettre aux étudiants (master, thèse) de participer.

EARIA (École d'automne de recherche d'information et applications). — Les écoles EARIA ont pour objectif principal de participer à la formation des doctorants dans le domaine de la recherche d'information. Les écoles EARIA offrent une occasion privilégiée de rencontres et discussions entre séniors du domaine et jeunes chercheurs, permettant ainsi à ces derniers de mieux situer leur projet de recherche. Les écoles EARIA sont complémentaires aux écoles ESSIR (*European Summer School on Information Retrieval*). Toutes deux sont organisées tous les deux ans : années impaires pour ESSIR, années paires pour EARIA.

1. <http://www.asso-aria.org>

Atelier RISE (Recherche d'information sémantique). — L'atelier RISE a pour but de proposer un lieu de rencontre entre des chercheurs issus de différentes communautés comme la recherche d'information, le web sémantique, le TALN, le multimedia, l'ingénierie des connaissances.

Journées Hackday. — Les *Hackdays* sont des journées destinées à fédérer et dynamiser la communauté autour de défis centrés sur la recherche d'information et du document (dans le cadre des conférences CORIA).

Journées thématiques. — L'ARIA organise ou participe régulièrement à un certain nombre de journées thématiques, comme par exemple avec l'AFIA (Association française d'intelligence artificielle) ou TALN.



Association des technologies de l'information pour l'éducation et la formation²

Objectifs. — *L'ATIEF a pour objectif de promouvoir la recherche et l'enseignement ainsi que la production, la communication et l'application de connaissances, dans le domaine des technologies de l'information et de la communication appliquées à l'éducation, la formation et l'apprentissage.*

Une communauté pluri- et inter-disciplinaire. — L'ATIEF fédère et met en synergie un ensemble de forces qui peuvent contribuer au développement des technologies de l'information et de la communication au service des apprentissages humains. Elle fonctionne comme une société savante et propose notamment :

- de réunir en un ensemble cohérent des compétences théoriques, méthodologiques et techniques issues de différentes communautés (informatique, sciences de l'éducation, ergonomie, psychologie, sciences cognitives, sciences du langage, sciences de l'information et de la communication, didactique), et qui portent sur des thèmes mutuellement complémentaires ;
- de proposer cet ensemble de compétences aux partenaires qui le souhaiteront, notamment aux pouvoirs publics ;

2. <http://www.atief.fr>

— de contribuer à la création et à la diffusion de connaissances, notamment à la visibilité nationale et internationale du domaine (groupes de travail, colloques, publications, relais français pour le groupe Informatique et éducation de l'IFIP et vis à vis des associations internationales dans le domaine).

L'ATIEF rassemble actuellement en moyenne 130 adhérents.

Conférences EIAH. — L'ATIEF organise tous les deux ans les conférences EIAH (Environnements informatiques pour l'apprentissage humain). Cette conférence rassemble l'ensemble de la communauté francophone (France, Belgique, Québec, Suisse, Afrique). La 9^e édition a eu lieu à Paris en juin 2019³.

Rencontres RJC-EIAH. — L'ATIEF organise tous les deux ans les rencontres RJC-EIAH (Rencontres jeunes chercheurs en EIAH). Ces rencontres se font les années où la conférence EIAH n'a pas lieu pour permettre aux doctorants de la communauté de présenter leur travaux et de discuter avec les chercheurs francophones du domaine. Les prochaines RJC auront lieu au printemps 2020⁴.

Revue STICEF. — L'ATIEF parraine également la revue STICEF (Sciences et technologies de l'information et de la communication pour l'éducation et la formation) qui continue, sous une forme remaniée, le projet éditorial de la revue Sciences et techniques éducatives (STE). STICEF rend compte de recherches conduites dans le domaine des technologies de l'information et de la communication au service des apprentissages humains. Ce champ couvre toutes les questions concernant la conception (y compris les méthodologies de conception), la réalisation (y compris les outils de réalisation), la mise en œuvre, la validation, l'évaluation, l'apprentissage et l'usage de technologies et dispositifs numériques pour les apprentissages humains⁵.

Un classement des revues et des conférences. — Pour éclairer les discussions qui ont lieu dans tous les comités d'évaluation, notamment le CNU, sur les publications du domaine EIAH, et pour contribuer à la visibilité du champ scientifique des EIAH, le bureau de l'ATIEF a entrepris de produire une liste des principales revues/conférences avec les classements usuels en A+, A, B, etc. Un argumentaire explique les principes qui ont conduit à ces classements. Ce classement est disponible sur <http://www.atief.fr/ressources/classement>.

Des groupes de travail. — L'ATIEF soutient des groupes de travail relatifs à des thématiques spécifiques, au sein du champ des EIAH, en valorisant les activités associées à ces groupes de travail sur son site web et lors des différentes manifestations organisées par l'ATIEF (conférences EIAH et RJC-EIAH). Ces groupes de travail se réunissent au moins une fois par an⁶.

3. <http://www.atief.fr/conferences-eiah>

4. <http://www.atief.fr/rjc-eiah>

5. <http://sticef.univ-lemans.fr/>

6. <http://www.atief.fr/gtatif>

Une communauté en lien avec l'international. — L'ATIEF est membre de l'alliance de sociétés savantes IAALDE depuis 2018. L'IAALDE (*International Alliance to Advance Learning in the Digital Era*) rassemble une dizaine d'associations internationales de chercheurs dans le domaine du numérique éducatif⁷. Crée en 2017, cette alliance vise à améliorer la communication et la collaboration entre les différentes sociétés savantes qui gèrent en particulier les grandes conférences et revues de notre domaine de recherche.



Association internationale francophone d'Extraction et de gestion des connaissances⁸

Objectifs. — *L'association a pour objet de rassembler les chercheurs académiques et industriels des disciplines de l'informatique décisionnelle, de l'extraction de connaissances dans les bases de données, de la gestion des connaissances, de la fouille de données, de l'apprentissage automatique et de tout autre domaine en lien.*

Conférence EGC2020. — Vingt ans déjà ! La conférence EGC a vingt ans. Elle a visité presque autant de lieux : Nantes (2001), Montpellier (2002), Lyon (2003), Clermont-Ferrand (2004), Paris (2005), Lille (2006), Namur (2007), Sophia-Antipolis (2008), Strasbourg (2009), Hammamet (2010), Brest (2011), Bordeaux (2012), Toulouse (2013), Rennes (2014), Luxembourg-Ville (2015), Reims (2016), Grenoble (2017), Paris (2018), Metz (2019). Et c'est maintenant au tour de Bruxelles, capitale de l'Europe, en 2020.

En vingt ans, EGC s'est imposée comme un lieu d'échanges heureux et fructueux à la convergence de plusieurs communautés scientifiques : ingénierie des connaissances, fouille de données, apprentissage automatique. Depuis 2001, l'intelligence artificielle a connu un essor extraordinaire qui s'est accompagné d'une croissance stupéfiante du nombre de chercheurs ainsi que du nombre et de la taille des conférences scientifiques. La contrepartie en est une grande fragmentation en thématiques et sous-thématiques des conférences avec souvent de multiples sessions en parallèle.

EGC a su préserver un esprit de partage et d'unité avec des sessions uniques et des temps d'échanges propices aux rencontres et discussions. Si l'Exploitation

7. <http://www.alliancelss.com/>

8. <http://www.egc.asso.fr/>

et la Gestion des Connaissances (EGC) couvre un large spectre de tâches depuis la préparation des données et leur organisation jusqu'à l'exploitation des connaissances et leur évaluation, la centralité de la notion de connaissances et son rôle fédérateur se révèlent extraordinairement forts et riches.

Au cours de ces vingt manifestations, les questions et les thèmes scientifiques abordés ont évolué. En examinant les tables des matières des conférences successives, il est possible de discerner une progression depuis le traitement de données essentiellement relationnelles et la recherche de règles à des données plus diverses correspondant à des objets plus complexes : textes, graphes, réseaux sociaux, web sémantique, séquences, flux de données, données spatio-temporelles, etc., avec l'objectif d'y découvrir des régularités et des relations plus riches que des règles. Les entrepôts de données ont laissé petit à petit la place à l'Internet. Le *big data* avec ses fortes contraintes d'efficacité a émergé et, avec lui aussi, les problèmes concourant de préservation de la vie privée. La recherche de motifs hiérarchiques, de préférences, de recommandations a émergé pour des besoins nouveaux.

La variété des questions abordées et des applications traitées sur ces 20 éditions de la conférence EGC est considérable. Pourtant, au milieu de ces changements, il y a une continuité. EGC a une signature, sans doute inconsciente, mais manifeste : on exploite et on construit de la connaissance, c'est-à-dire une information qui se veut explicite, à usage d'experts.

À côté de son positionnement interdisciplinaire, rassemblant des communautés ailleurs séparées, EGC se distingue donc par l'accent mis sur l'intelligence, ce qui se raisonne. En ces temps où l'on commence à vouloir demander des comptes aux voitures autonomes dans leurs choix de conduite, aux systèmes d'aide à la décision qui envahissent tous les champs des activités humaines, accord de crédits bancaires, sélection de ses employés, prédiction de criminalité, etc., il s'agit évidemment d'un positionnement visionnaire.

EGC a vingt ans et un bel avenir, au cœur des préoccupations qui se lèvent : apprentissage non-supervisé, la matière noire de l'apprentissage automatique selon Yann LeCun, interprétabilité des modèles appris à partir de données, exploitation et construction de connaissances sémantiques, identification de relations plus riches que des corrélations, par exemple la causalité et, plus généralement, inscription et inter-fécondité des connaissances produites par l'intelligence artificielle dans les connaissances et théories des experts.

La 20^e édition d'EGC fut à la fois exceptionnelle et fidèle aux tendances profondes manifestées lors des 19 éditions précédentes. Exceptionnelle car, pour la première fois, fut organisée une journée grand public, le 29 janvier, ouverte à tous ceux qui s'intéressent à l'intelligence artificielle. Les participants ont eu l'occasion de suivre des conférences invitées, de découvrir sous une forme pleine d'allant et d'humour les thèmes des papiers longs retenus, lors de la session *Minute of madness*, de

discuter avec des industriels du secteur et, en fin de journée, de s'interroger avec des experts lors de la table ronde portant sur « Promesses et risques : quel monde pour demain avec l'IA ? ».



Maison des mathématiques et de l'informatique⁹

La MMI, c'est quoi. — *Créée en 2012 par le Laboratoire d'excellence en mathématiques et informatique fondamentale de Lyon (Labex MILYON) porté par l'université de Lyon dans le cadre de l'IDEXLYON, la Maison des mathématiques et de l'informatique utilise des expositions, contes, ateliers, jeux, spectacles, conférences, etc., pour permettre à toutes et tous de découvrir et comprendre le monde qui nous entoure. Pionnière du genre, la MMI est un centre de médiation des savoirs dédié aux sciences mathématiques et informatiques via une approche vivante, ludique et pluridisciplinaire. Entièrement piloté par des enseignants-chercheurs passionnés, c'est un lieu où convergent science, art, musique, histoire, architecture... pour une expérience nouvelle des mathématiques et de l'informatique !*

Sous la surface, les maths. — Du 5 octobre 2019 au 27 juin 2020, la MMI présente l'exposition *Sous la surface, les maths*, qui vous invite à explorer la question de façon ludique et découvrir ainsi la face cachée de ces univers fascinants.

Comment produire une image plate fidèle à la réalité ? Question déjà essentielle sur une toile pour les peintres de la Renaissance, elle est devenue centrale sur un écran avec les jeux vidéo et les films d'animation. Les infographistes travaillent sans cesse à améliorer le rendu de leurs œuvres. Et pour cela, ils utilisent des outils mathématiques d'hier et d'aujourd'hui.

Tout au long de la saison, la MMI donne rendez-vous pour des conférences, des rencontres, des projections et des ateliers à destination de tous les publics, autour des thématiques de l'exposition : Jeudis de la MMI, Ciné mathématiques spécial animation...

9. <https://mmi-lyon.fr/>

MMI et médiation scientifique. — La MMI, c'est également un centre de recherche en médiation scientifique qui organise régulièrement des séances de *brainstorming* entre professionnels lors des JAM : la dernière a eu lieu du 22 au 23 mars et a porté sur les jeux vidéo scientifiques.

Journée « info sans ordi » organisée par la SIF¹⁰. — Après le succès de l'édition parisienne, la SIF organise une nouvelle journée de découverte d'activités d'informatique sans ordinateur à la MMI le samedi 6 juin 2020. Destinée à un public large (enseignants, animateurs, enseignants chercheurs et personnes curieuses de découvrir l'informatique de manière originale), cette journée permettra, au travers d'ateliers pratiques, de découvrir comment présenter l'informatique sans ordinateur. Si le thème vous intrigue, si vous aimeriez parler d'informatique autrement, si vous ne voyez pas le lien entre des gobelets et l'intelligence artificielle ou si vous croyez qu'on ne peut pas faire vivre l'informatique sans électronique à des enfants à partir de la fin de maternelle, cette journée est pour vous. Venez jouer, découvrir, et même créer et animer des activités informatiques débranchées à la MMI le samedi 6 juin 2020 ! Des intervenants spécialistes seront là pour vous faire découvrir des activités que vous pourrez reproduire ensuite avec un public très large, et pourront vous conseiller si vous envisagez de créer vos propres activités. Inscription et information sur le site de la SIF.

Saison 2020-2021. — La saison 2020-2021 de la MMI sera consacrée à l'intelligence artificielle. Retrouvez-nous du 3 au 5 avril pour une JAM consacrée à cette thématique. Au programme, construction d'actions de médiation autour de la future exposition de la saison 2020-2021. Ces ateliers (et autres) pourront également servir à nos partenaires (l'IHP et Fermat Science), futurs hôtes de l'exposition.

À l'occasion de la fête de la science 2020, la MMI propose de mettre à l'honneur le mathématicien et informaticien Alan Turing, en particulier sa contribution à la théorie de la calculabilité et aux fondements de la science informatique avec la notion théorique de machine de Turing. Plusieurs ateliers seront proposés aux classes sur ces thèmes, avec en vedette la machine de Turing en Lego.

10. <https://www.societe-informatique-de-france.fr/2020/02/journee-info-sans-ordi-2020>



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE
ET D'AIDE À LA DÉCISION

Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision¹¹

Objectifs. — *La ROADEF est une société savante. Elle vise à promouvoir la recherche opérationnelle et l'aide à la décision (RO/AD) en France, à faciliter les relations entre industriels et chercheurs académiques dans ce domaine et à aider au développement des enseignements liés à cette discipline. ROADEF est membre d'EURO, l'association des sociétés européennes de recherche opérationnelle, et d'IFORS, la fédération internationale des sociétés de recherche opérationnelle.*

Description. — La recherche opérationnelle (RO) peut se définir comme la mise en œuvre de méthodes scientifiques en vue de prendre la meilleure décision possible. Elle permet de rationaliser, simuler et optimiser la conception et le fonctionnement de systèmes ou d'organisations. C'est une discipline au carrefour des mathématiques appliquées, de l'informatique et de l'économie.

Gestion des places en internat sur Parcoursup : un problème de recherche opérationnelle. — La plateforme d'affectation des bacheliers aux formations de l'enseignement supérieur, Parcoursup, gère chaque année les candidatures de centaines de milliers de candidats. Un des problèmes à traiter concerne la gestion des candidatures pour les places dans les internats des classes préparatoires qui s'effectue en même temps que la gestion des candidatures pour les places dans les formations elles-mêmes. La difficulté vient notamment du fait que les critères de classement pour ordonner les candidats à une formation ne sont pas les mêmes que les critères de classement pour ordonner les candidats à un internat lié à cette formation. Dans le dernier numéro de notre bulletin semestriel, « *On the ROAD, un peu de ROADEF pour la route* », deux des concepteurs de Parcoursup, Claire Mathieu et Hugo Gimbert, présentent l'algorithme permettant d'optimiser la répartition des places et de remplir le mieux possible les formations de classe préparatoire et les internats qui y sont liés. Dans la phase finale de Parcoursup, cet algorithme est exécuté quotidiennement afin de proposer rapidement les places libérées à la suite d'un refus ou d'une démission. L'article complet de Claire Mathieu et Hugo Gimbert est consultable gratuitement¹².

11. <https://www.roadef.org/>

12. <https://www.roadef.org/bulletins/bulletinNo41.pdf>

Open Journal of Mathematical Optimization : un outil pour répondre aux enjeux de la science ouverte. — La ROADEF soutient OJMO¹³ (*Open Journal of Mathematical Optimization*). Cette nouvelle revue scientifique, créée en 2019, publie des articles dans le domaine de l'optimisation mathématique. Elle couvre les aspects théoriques et numériques de l'optimisation (optimisation continue, optimisation discrète, optimisation sous incertitude). OJMO est un journal en libre accès équitable. Il est complètement gratuit pour toutes les parties : il n'y a pas d'abonnement à payer pour pouvoir consulter et télécharger les articles et les auteurs d'un article n'ont pas à payer pour le faire publier. OJMO est également favorable aux données ouvertes et au code ouvert et encourage fortement ses contributeurs à fournir les données et le code au moment de la soumission de leur manuscrit.

13. <https://ojmo.centre-mersenne.org/>



La Nuit de l'info, le plus *fun serious-game* regroupant des milliers d'étudiants

Le bureau de la Nuit de l'info¹

Né de l'initiative d'un groupe d'enseignants de Mulhouse et Sophia Antipolis en 2007, la Nuit de l'info se positionne à la croisée des chemins entre l'informatique, la pédagogie, la rencontre avec des professionnels et le divertissement.

La Nuit de l'info est une compétition nationale qui réunit, début décembre, étudiants du supérieur (de bac à bac+8), enseignants et entreprises pour travailler ensemble sur le développement d'une application informatique (généralement web).

Le principe est simple : les participants ont une nuit pour développer une application, tout en relevant des défis (ergonomie, architecture, collaboration, gestion de projet, modélisation, etc.) lancés par des partenaires (laboratoires, PME, grands groupes, associations, etc.) afin de remporter des prix allant de Raspberry Pi à des chèques cadeaux jusqu'à 1500 €.

La force de cet événement : la rencontre ; celle des enseignants et des étudiants dans un cadre non-institutionnel, celle des partenaires et des étudiants pour découvrir de nouveaux talents. La Nuit de l'info est un élément de plus ajouté systématiquement par les étudiants sur leur CV.

Partie d'un effectif de 202 étudiants en 2007, la Nuit a réuni pour sa treizième édition en 2019 plus de 4000 participants, issus de 110 écoles, afin de relever les 50 défis proposés. Ces chiffres sont en constante progression.

Car la Nuit de l'info est une organisation totalement décentralisée. Seuls quelques membres volontaires (et bénévoles) forment le bureau national pour assurer la gestion du site, des inscriptions, du sujet national ou du *sponsoring*. La recherche de

1. <https://www.nuitdelinfo.com>, nuitinfo-bureau@polytech.unice.fr.

défis, l'accueil des étudiants, le lien avec les partenaires sont réalisés au niveau de chaque *hub*, ce lieu de convergence et de rencontre entre étudiants, enseignants et partenaires.

Depuis 2014, la Nuit se veut encore plus humaniste et propose d'œuvrer sur des thèmes tels que les urgences, les réfugiés, la sécurité routière, les milieux hostiles ou la précarité étudiante.

Pour terminer, citons l'expérience des étudiants de l'IUT du Littoral Côte d'Opale : « [...] cette nuit a permis aux 50 étudiants participants de créer un lien unique entre les deux promotions de DUT. Ils ont pu s'entraider [...], se donner des astuces de programmation, se passer les bon *tutos* ou encore danser et ronfler ensemble. Ils ont aussi pu voir l'IUT et leurs enseignants sous un autre angle ».

Les membres du bureau de la Nuit de l'info sont : Céline Auzias, Xavier Blanc, Jean-Michel Bruel, Maxime Devanne, Stéphane Isnard, Stéphane Ribas, Julio Santilario Elena, Rémi Synave en sachant que les personnes à l'origine de ce projet sont Pierre-Alain Muller, Sébastien Mosser et Mireille Blay-Fornarino.

FEMMES ET INFORMATIQUE



Agissons ! Les femmes scientifiques et ingénierues font des propositions pour plus de mixité dans les métiers d'ingénierues et de scientifiques

Florence Sèdes¹



En France comme dans tous les pays industrialisés, les vocations vers les métiers scientifiques et techniques ne sont pas à la hauteur des besoins estimés, et les femmes sont, sans raisons objectives, minoritaires dans ces métiers. Dans les entreprises, universités et centres de recherche, les compétences des femmes scientifiques, techniciennes et ingénierues ne sont pas suffisamment reconnues et utilisées ; c'est une perte pour l'économie de la nation et une injustice pour ces femmes.

1. Professeure d'informatique à l'université Toulouse 3 et chargée de mission Femmes et informatique à la SIF.



Agissons ! Les femmes scientifiques et ingénieres font des propositions pour plus de mixité dans les métiers d'ingénieres et de scientifiques.

Les associations Femmes & mathématiques², Femmes & sciences³ et Femmes ingénieres⁴, associations reconnues pour leur expertise dans le domaine de l'orientation des jeunes vers les métiers des sciences et techniques et dans le domaine de la promotion des femmes scientifiques, techniciennes et ingénieres, se sont unies pour faire des propositions qui suscitent et accompagnent les changements sociaux, économiques, industriels et environnementaux des prochaines années. Elles se sont associées, pour cela, avec deux sociétés savantes, la Société française de physique⁵ et la Société informatique de France⁶, œuvrant dans des domaines où les femmes sont minoritaires, et qui se mobilisent pour aller vers la parité et l'égalité.

Ce travail a été complété par une réflexion plus large, dans le cadre du Grand débat le 4 mars 2019, incluant les associations suivantes : Femmes ingénieres, Cercle inter'elles, All In, BPW France, Mines parité (Mines Paris), Sciences ParisTech au féminin (10 grandes écoles d'ingénieries), Femmes & sciences, Femmes et mathématiques, Digital Ladies & Allies, Talents du numérique, Global Contact (Gender Scan & Science Factor), Réseau entreprendre au féminin.

Dans la perspective des grandes lois en cours, celle concernant l'émancipation économique des femmes ainsi que la loi de programmation pluriannuelle de la recherche (LPPR), et pour accompagner l'évolution de l'école et de la société sur les grands enjeux, ces associations et sociétés savantes ont préparé vingt-six propositions concrètes pour :

- (1) Repenser la place des sciences et de l'ingénierie dans l'éducation.
- (2) Encourager l'orientation des jeunes, plus particulièrement des jeunes filles, vers les filières scientifiques et techniques.
- (3) Combattre les stéréotypes sur les femmes et les sciences.
- (4) Dynamiser la carrière des femmes scientifiques, techniciennes et ingénieres.

Ces propositions portent sur l'enseignement des sciences, l'orientation scolaire, les représentations des femmes dans les sciences, et la carrière des femmes scientifiques, techniciennes et ingénieres.

Parmi ces propositions⁷, numérotées de 1 à 26, voici les six prioritaires :

-
2. <http://www.femmes-et-maths.fr/>
 3. <http://www.femmesetsciences.fr/>
 4. <http://www.femmes-ingenieurs.org/>
 5. <https://www.sfpnet.fr/>
 6. <https://www.societe-informatique-de-france.fr/>
 7. <http://www.femmesetsciences.fr/download/9282>

Proposition 5 : Faire un enjeu national de l'information des élèves, des professionnelles et professionnels de l'orientation, des enseignantes et enseignants et des parents sur les métiers scientifiques et techniques en montrant qu'ils conviennent tout autant aux filles qu'aux garçons.

Proposition 6 : Faire en sorte que chaque élève ait été sensibilisé aux métiers techniques au moins une fois dans son cursus d'étude, *a minima* aux moments-clés de l'orientation.

Proposition 13 : Généraliser une formation initiale et continue sur l'égalité filles-garçons pour les enseignantes et enseignants et les psychologues de l'éducation nationale, et ceci pour les personnels du premier degré, du second degré général, technologique ou professionnel, et du supérieur.

Proposition 14 : Mettre en place et promouvoir une charte égalité pour les manuels scolaires, les livres et les productions multimédias destinés à la jeunesse.

Proposition 19 : Faire en sorte qu'il y ait davantage de femmes ingénierues ou scientifiques dans les conseils économiques, sociaux et environnementaux régionaux (CESER).

Proposition 24 : Attribuer un bonus de budget aux établissements.

HOMMAGE



Hommage à Jacques Pitrat

Jean-Gabriel Ganascia¹

C'est avec une grande tristesse que nous avons appris la disparition de Jacques Pitrat le lundi 14 octobre 2019.

Chercheur reconnu, *fellow* de l'EurAI (*European Association for Artificial Intelligence*) et du AAAI (*Association for the Advancement of Artificial Intelligence*), membre d'honneur de l'Association française d'intelligence artificielle (AFIA), animé toute sa vie scientifique d'une authentique passion pour l'intelligence artificielle, il fût en France l'un des pionniers de cette discipline qu'il contribua à populariser. Par ses cours, par ses ouvrages, mais surtout par son enthousiasme, il su communiquer sa passion à nombre de ses élèves qui ont eux-mêmes poursuivi dans cette voie. À titre personnel, j'ai été l'un d'entre eux. Je me souviens avec émotion de ses cours de traitement automatique de la langue naturelle que j'ai suivis lorsque j'étais étudiant du DEA IARFAG (Intelligence artificielle, reconnaissance des formes et applications graphiques). Je me souviens aussi que, bien des années plus tard, il a présidé mon jury de thèse d'État, ce dont je lui suis reconnaissant.

Pour saisir son apport, rappelons son parcours en quelques dates : né en 1934, il entre à l'École polytechnique à l'âge de 20 ans, en 1954, puis devient ingénieur de l'armement en 1957 avant d'être nommé adjoint au chef du service des Machines



Jacques Pitrat lors d'une conférence à Sorbonne Université en 2018.

1. LIP6 (UMR CNRS 7606), Sorbonne Université, Institut universitaire de France

à calculer du laboratoire central de l'Armement (LCA) en 1959. Soulignons que l'ENIAC, le premier ordinateur électronique n'avait été fabriqué qu'en 1946 aux États-Unis ; c'étaient donc des machines très nouvelles que ces calculateurs, et ce d'autant plus dans le contexte français où l'on a beaucoup tardé à en produire, et plus encore à en utiliser dans le monde universitaire. Il s'engage dès 1960 dans un doctorat en intelligence artificielle, domaine très novateur à l'époque, puisque l'école d'été de *Dartmouth College* considérée comme l'événement séminal de cette discipline ne s'est tenue que quatre ans plus tôt, en 1956. Il soutient en 1966 une thèse d'État [1] à la faculté des sciences de l'université de Paris. Celle-ci porte sur la démonstration automatique de théorèmes de logique avec des méthodes heuristiques. Cela s'inscrivait dans la lignée des travaux d'Alan Newell, d'Herbert Simon et de Cliff Shaw qui avaient conduit, dès 1956, au premier programme de démonstration automatique de théorèmes, le *Logic Theorist*. Jacques Pitrat en profita pour programmer l'unification et la résolution qui venaient d'être inventées par Robinson en 1965. Il rentre ensuite au CNRS dès 1967 où il passera toute sa carrière de chercheur, jusqu'à sa retraite en 2000, ce qui lui permettra d'aborder des champs variés de l'intelligence artificielle et de former beaucoup d'étudiants tant dans les cours qu'il a dispensés en DEA (Master 2) que dans les nombreuses thèses qu'il a encadrées (on en compte pas moins de soixante-dix !).

Au début de sa carrière de chercheur, il programme un système général de jeu qui fait l'objet d'un article fondateur en 1968 [2]. Il travaille sur cette thématique tout au long des années soixante-dix en publiant de nombreux articles dont [7] et [3]. Il continuera avec ses étudiants, en particulier avec Jean-Louis Laurière, puis ultérieurement avec plusieurs autres de ses doctorants, dont par exemple, dans les années quatre-vingt-dix, Bruno Bouzy et Tristan Cazenave qui aborderont très précocement le jeu de Go, à une époque où l'on était encore loin d'imaginer qu'une machine l'emporterait un jour sur les meilleurs d'entre les hommes.

Il poursuit ensuite ses recherches sur la satisfaction de contraintes avec Jean-Louis Laurière qui passe une thèse d'État très novatrice sur le sujet en 1977, sur la résolution de problèmes [6] et sur le traitement automatique du langage naturel [4], domaines dans lesquels il fait soutenir plusieurs thèses, dont celles de Jean-Marc Fouet et Marie-Odile Cordier.

À partir du milieu des années quatre-vingt, pour mieux aborder la résolution de problèmes, il centre ses travaux sur la métacognition [5], c'est-à-dire sur les stratégies d'utilisation des connaissances. Il programme alors le système MACISTE et s'intéresse à la psychologie cognitive [8], à la question de la conscience des machines [10], puis aux théories de l'amorçage auxquelles il consacre ses derniers efforts de recherche qu'il poursuivra inlassablement après son départ en retraite, jusqu'à la fin, avec entre autre la programmation du système CAIA (Chercheur artificiel

en intelligence artificielle). La conférence qu'il donna en novembre 2018 au colloquium d'informatique de Sorbonne Université² illustre fort bien ce que furent ses ultimes préoccupations scientifiques.

Outre ses recherches et son enseignement, Jacques Pitrat a dirigé de 1980 à 1985 le laboratoire Claude-François Picard-GR22, devenu ensuite le LAFORIA (laboratoire formes et intelligence artificielle), un des trois laboratoires d'informatique de l'université Pierre et Marie Curie (ancienne faculté des sciences de Sorbonne Université) qui ont donné naissance au LIP6 (laboratoire d'informatique de Paris VI) en 1997. Au sein du LAFORIA, il a animé l'équipe de recherche Métaconnaisances.

Comme ce bref survol des travaux de Jacques Pitrat en témoigne, son activité couvre, tout au long de sa carrière, un large spectre des différents champs de l'intelligence artificielle et s'inscrit dans la tradition de la résolution de problèmes inaugurée par les pionniers de cette discipline comme Herbert Simon, à qui il consacre d'ailleurs un article [9]. Mais, ce qui marque le plus dans son itinéraire, c'est sa foi dans les possibilités de l'intelligence artificielle, en particulier dans une intelligence artificielle qu'il qualifie de forte en ce qu'elle serait capable de dépasser les capacités cognitives humaines, et dans la survenue d'une Singularité, le terme étant entendu ici au sens mathématique d'un point critique dans l'histoire de l'humanité au-delà duquel la machine deviendrait « plus intelligente » que l'Humain. Cependant, à la différence des zélateurs nord-américains ou européens de la singularité technologique, comme Raymond Kurzweil ou Nick Bostrom, il ne dessine pas de scénario défini, avec des dates précises ; il n'évoque pas non plus une post-humanité, à savoir une disparition de l'Humain ; il ne spéule pas sur le peuplement de la Terre après la Singularité, que les machines se substituent à l'humanité ou que nous nous hybridions à des machines et constituions ce que l'on appelle une transhumanité ; enfin, ses prédictions ne reposent pas simplement sur l'accroissement exponentiel des capacités des machines et sur la poursuite de la loi de Moore, mais sur la capacité que l'on aura à les programmer correctement.

En cela, sa vision se démarquait d'un déterminisme technologique aveugle. Il croyait surtout à la puissance de la récursivité, ce dont attestent les titres de nombre de ses publications comme « Un problème difficile : résoudre des problèmes » [6] ou « *The Conscience of a Conscious Machine* » [10] ou encore la signification du sigle CAIA (Chercheur artificiel en intelligence artificielle) qu'il a choisi pour le programme sur lequel il a fait porter ses derniers efforts. L'enthousiasme qu'il manifesta à la lecture de l'ouvrage de Douglas Hofstadter, « Gödel, Escher et Bach »³ en témoigne aussi. En ce qu'elle traduisait la puissance de la récursivité, la notion

2. http://video.upmc.fr/differe.php?collec=S_C_colloquium2018&video=6

3. Douglas Hofstadter, « Gödel, Escher, Bach - Les brins d'une guirlande éternelle », trad. française, Dunod, 2008

de *bootstrap*, c'est-à-dire de programme d'amorçage, fût au cœur de ses préoccupations. Pour en illustrer l'importance, il prenait des exemples tirés de l'informatique, comme le fait que la conception d'ordinateurs se fait avec des ordinateurs ou que les compilateurs sont écrits dans le langage même qu'ils doivent compiler. Il prenait aussi des exemples tirés du génie civil ou de la culture et de l'évolution des sociétés. Le concept d'amorçage qu'il déploya dans les programmes qu'il concevait visait à traduire l'essence de cette idée de récursivité dans un système informatique qui s'auto-améliorerait de façon indéfinie.

Il est encore difficile d'apprécier pleinement la fécondité des lignes directrices des recherches qu'il a poursuivies, car d'autres seront maintenant amenés à les reprendre et à les déployer. Nous ne le ferons donc pas ici. Le futur le dira. En revanche, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que, par son action, par ses enseignements, par les chercheurs qu'il a formés et par ses propres travaux, Jacques Pitrat a amorcé la recherche en intelligence artificielle en France et que cet amorçage a toujours un effet important qui, loin de s'éteindre, continue de s'amplifier.

Enfin, au-delà de ses qualités de scientifique, c'était aussi et avant tout un homme généreux et surtout une personne très fidèle à ses engagements, qu'il s'agisse de ses engagements personnels ou d'engagements scientifiques qu'il avait pris. Cela tenait certainement, là encore, à l'importance qu'il accordait à l'amorçage et à l'amorce, à savoir à ce qui permet d'engager...

Références

- [1] Jacques Pitrat. Réalisation de programmes de démonstration de théorèmes utilisant des méthodes heuristiques. Thèse d'État, 1966. Faculté des sciences de l'Université de Paris.
- [2] Jacques Pitrat. Realization of a general game-playing program. In *IFIP Congress*, volume 2, pages 1570–1574, 1968.
- [3] Jacques Pitrat. A chess combination program which uses plans. *Artificial Intelligence*, 8(3), 1977.
- [4] Jacques Pitrat. *An Artificial Intelligence Approach to Understanding Natural Language*. North Oxford Academic, 1988.
- [5] Jacques Pitrat. *Méta-connaissances, futur de l'intelligence artificielle*. Hermès, 1990.
- [6] Jacques Pitrat. Un problème difficile : résoudre des problèmes. *Sciences*, 97, 1997.
- [7] Jacques Pitrat. Games : The Next Challenge. *ICCA Journal*, 21(3) :147–156, September 1998.
- [8] Jacques Pitrat. Vers une nouvelle pensée. *Sciences humaines*, (35) :32–35, December 2001.
- [9] Jacques Pitrat. Herbert Simon, pionnier de l'Intelligence Artificielle. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série RIA : Revue d'Intelligence Artificielle*, 16(1-2) :11–16, 2002.
- [10] Jacques Pitrat. *Artificial Beings : The Conscience of a Conscious Machine*. Wiley, 2009.



GENCI : Grand équipement national de calcul intensif

Jean-Philippe Proux, Delphine Théodorou, Pascal Voury¹

GENCI est une très grande infrastructure de recherche (TGIR), qui a pour mission de *mettre le calcul intensif au service de la recherche scientifique, de l'innovation et de la compétitivité des entreprises*. GENCI est un opérateur public de l'État, doté d'un budget de fonctionnement de 39 millions d'euros, dont les associés sont le MESRI (49 %), le CEA (20 %), le CNRS (20 %), les universités représentées par la Conférence des présidents d'université (10 %) et enfin Inria (1 %).

Les principales missions de GENCI sont :

- (1) *Définir et mettre en œuvre la stratégie nationale d'acquisition de moyens de calcul intensif et de stockage de données.* Ceci passe par des dialogues compétitifs, avec les compétences nécessaires à l'acquisition de calculateurs et de moyens de stockage dont les performances sont optimales pour les besoins des chercheurs. GENCI finance ces moyens de calcul et de stockage, coordonne leur exploitation et gère l'attribution des ressources mises ainsi à disposition sans coût pour les chercheurs.
- (2) *Promouvoir la simulation et le calcul intensif.* GENCI s'assure que tous les besoins en calcul intensif de la recherche académique, mais aussi de l'industrie, soient couverts avec une implication dans toute l'échelle des moyens disponibles, depuis les centres régionaux, en passant par les centres nationaux, jusqu'aux centres européens.

1. GENCI, <http://www.genci.fr>

(3) *Soutenir l'écosystème du calcul intensif au niveau européen.* GENCI représente la France dans l'infrastructure PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) et dans l'initiative EuroHPC récente, dont l'objectif est de construire des machines d'une puissance de l'ordre de l'exaFLOPS (10^{18} floating-point operations per second) en Europe en 2022–2024 (avec du matériel européen, processeurs compris) comme l'a déjà fait la Chine en 2019 et comme le feront les États-Unis en 2021.

De plus, depuis 2019, GENCI est chargé du volet calcul de la mise en œuvre du plan *AI for Humanity*, suite à la remise du rapport Villani en intelligence artificielle. L'ensemble des missions de GENCI sont représentées graphiquement sur la figure 1.

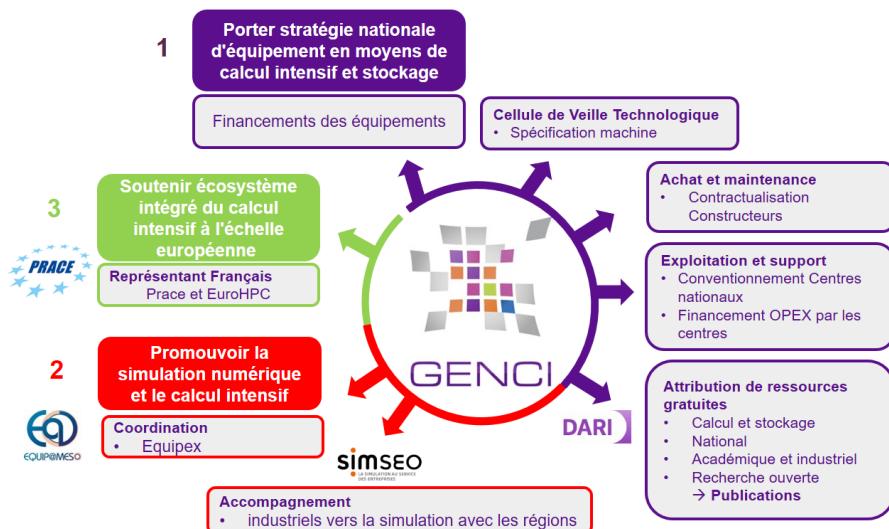


FIGURE 1. Les missions de GENCI.

À l'échelle européenne, les moyens sont répartis en *tiers* comme le montre la figure 2 (Tier2 pour le niveau régional jusqu'à Tier0 pour le niveau européen). Une particularité de GENCI est d'intervenir sur les trois niveaux à la fois. Actuellement, une machine européenne offre de l'ordre de 20 pétaFLOPS (10^{15}) avec plusieurs centaines de milliers de coeurs ; une machine nationale dispose de dizaines de milliers de coeurs pour une puissance de 3 à 15 pétaFLOPS. Nous allons balayer la structure de la pyramide du bas vers le haut : tout d'abord, l'écosystème régional, puis les structures à l'échelle nationale avec l'apport récent du plan *IA for Humanity* ; enfin, les centres européens dont l'évolution va modeler l'avenir de l'offre de moyens de calcul.



FIGURE 2. Répartition des moyens de GENCI.

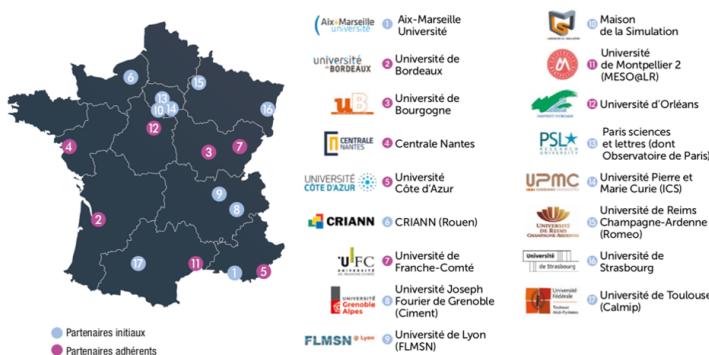


FIGURE 3. Centres de calcul régionaux.

Les centres de calcul régionaux

L'EQUIPEX Equip@meso a permis d'investir 11 millions d'euros dans les centres sur la période 2011-2019, en contribuant au financement d'environ 80 % de la puissance de calcul installée en régions (cf. figure 3). Ce réseau a permis de développer les interactions entre centres, mais aussi de mettre en place un soutien à la simulation numérique pour des TPE, PME et même ETI locales.

Les centres de calcul nationaux

Les centres de calcul nationaux utilisés par GENCI sont au nombre de trois :

- Le CINES (Centre informatique national de l'enseignement supérieur) situé à Montpellier. Il dispose de la machine Occigen, installée en 2015.
- L'IDRIS (Institut pour le développement et la recherche en informatique scientifique) du CNRS à Orsay. Il a installé mi-2019 la machine Jean Zay.

— Le TGCC (Très grand centre de calcul) du CEA, situé à Bruyères-le-Châtel, opère la machine Joliot-Curie, qui est la seule à être mise à disposition de l'infrastructure PRACE pour 60 % de sa capacité.

L'ensemble de ces machines permet, au début de l'année 2020, de mettre à disposition de la communauté recherche française un peu plus de 40 pétaFLOPS. Ces trois centres permettent de mettre à disposition de toute équipe de recherche académique française, ou de tout industriel ayant un projet de recherche ouverte (publiable), des supercalculateurs de technologies différentes mais complémentaires : on dispose ainsi de calculateurs généralistes, mais aussi de machines accélérées par des GPUs, ainsi que de toute l'infrastructure nécessaire pour stocker ou analyser efficacement les résultats des calculs effectués.

Globalement, tous les dix mois, GENCI fait évoluer ces architectures, avec pour résultat un doublement chaque année en moyenne de la puissance de calcul mise à disposition de la recherche.

GENCI coordonne une cellule de veille technologique pour anticiper sur l'architecture des futures machines : cela passe par l'animation d'un groupe de vingt experts issus des associés, mais aussi par l'acquisition et la mise à disposition de prototypes, comme actuellement le supercalculateur Inti au TGCC, constitué de 60 processeurs ARM (1920 cœurs). Deux anciens prototypes, basés l'un sur une architecture à grand nombre de cœurs Intel et l'autre sur une architecture accélérée GPU d'IBM, viennent d'être décommissionnés. Cette veille technologique continue permet d'identifier, de tester les dernières technologies et de s'assurer que l'écosystème mis en œuvre par un constructeur est suffisamment mature pour être efficace pour les chercheurs.

Le plan intelligence artificielle

D'après un bilan établi par le MESRI en 2018, la France est leader mondial pour la production d'articles en IA avec 5000 chercheurs répartis dans plus de 250 équipes. Par ailleurs, 300 *startups*, 80 PME et ETI ont une activité significative.

L'objectif de ce plan est de maintenir la France dans le domaine de l'IA en tête en Europe et dans le *top* cinq mondial, en doublant le nombre de doctorants et en permettant l'accès aux calculateurs de GENCI à 300 chercheurs au départ, puis à un millier par la suite.

Cet objectif a été rendu public fin mars 2018 par l'annonce présidentielle du plan *AI for Humanity*, basé sur le rapport Villani. Il est décliné au niveau du MESRI par un plan stratégique présenté par M^{me} Vidal en novembre 2018. Deux buts sont visés : apporter une puissance souveraine pour la recherche française en IA et aider au rapprochement des communautés HPC et IA.

Les conséquences concrètes de ce plan sont :

— *Un supercalculateur en partie dédié à l'intelligence artificielle.* Début 2019, GENCI a acquis l'un des plus puissants supercalculateurs en Europe, dénommé Jean Zay², installé au centre de calcul IDRIS du CNRS sur le plateau de Saclay. Cette machine, d'une puissance de calcul supérieure à 15 pétaFLOPS, étend les usages classiques du calcul à haute performance (HPC) à de nouveaux usages pour l'IA. Il comporte plus d'un millier de processeurs spécialisés, appelés GPU. Trois millions de dollars de dons sont apportés par Facebook, qui permettent d'augmenter encore la puissance de calcul disponible pour l'IA : en mai 2018, Mark Zuckerberg avait annoncé vouloir soutenir la recherche publique française en IA.

— *La facilitation de l'accès au calcul.* Afin de répondre aux besoins spécifiques des communautés de recherche en IA, une procédure particulière d'accès aux moyens de calcul a été définie par GENCI sur recommandation de l'alliance ALLISTENE (présidée par Inria). Cette nouvelle procédure appelée « Accès dynamique³ » a été mise en place en 2019 et permet notamment de disposer de ressources de calcul à la volée.



PRACE et les centres de calcul européens

Les machines disponibles permettent aux scientifiques européens familiers avec le HPC d'accéder à des puissances de calcul supérieures à celles mises à disposition au niveau national, grâce à deux appels à projets par an⁴. La machine Joliot-Curie, installée au TGCC, présente la particularité d'être disponible aussi bien grâce aux appels à projets nationaux qu'européens avec PRACE.

Les scientifiques français ont su s'approprier ces ressources : à l'échelle européenne, ils font partie des premiers bénéficiaires en nombre de projets ou en nombre d'heures.

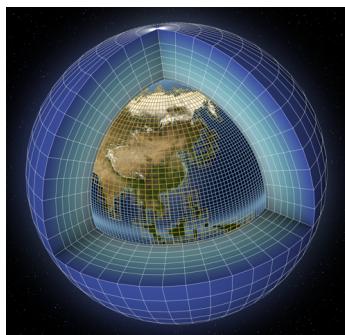
2. https://www.youtube.com/watch?time_continue=92&v=abtueZZlrk

3. <https://www.youtube.com/watch?v=Marx-BSFMN0&t=1s>

4. <http://www.prace-ri.eu>

Exemples d'utilisation des moyens de GENCI

Recherche académique : modélisation du climat



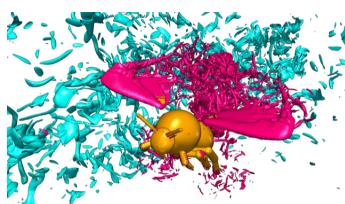
Terre grillée à très haute résolution.

©Anima, F. Durillon pour le
LSCE/CEA/IPSL.

Depuis 2007, GENCI apporte un soutien de taille aux équipes françaises impliquées dans les simulations des exercices internationaux CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) en leur donnant accès à ses moyens de calcul et de stockage des données, mais également en répondant spécifiquement à leurs besoins. C'est le cas pour les demandes de l'institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), impliqué dans les exercices CMIP, dont l'analyse constitue une part importante des différents rapports du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat). Les simulations CMIP5 ont ainsi servi de référence aux négociations de la COP21. Le dernier exercice en date, CMIP6, a vu la mise en œuvre d'une nouvelle génération de modèles climatiques de plus haute résolution. Là encore, GENCI a mis à disposition une allocation dédiée de calcul et des espaces de stockage spécifiques aux équipes de l'IPSL sur la période 2015 à 2019, ce qui leur a permis d'être les premiers à mettre les résultats de leurs simulations à disposition de la communauté internationale.

Recherche industrielle : le bourdon, source d'inspiration pour les micro-véhicules aériens

Le vol du bourdon se révèle être une mine d'informations pour concevoir de nouvelles générations de micro-véhicules aériens (drones par exemple). La mise au point d'une soufflerie numérique a permis de faire voler un modèle de bourdon à une vitesse de 2,5 m/s (9 km/h). Les simulations ont montré que les mécanismes de vol du bourdon pour créer de la portance sont robustes même en fortes turbulences, car il n'y a pas d'énergie supplémentaire requise. Néanmoins le contrôle de la turbulence reste un défi pour le bourdon, mais pas d'un point de vue énergétique.

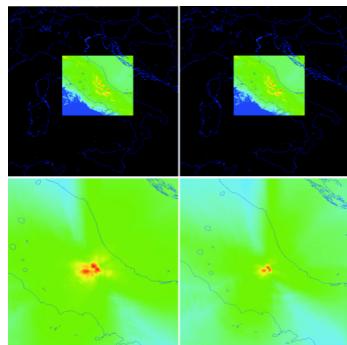


Soufflerie numérique montrant les tourbillons créés par les ailes battantes du bourdon. Kai Schneider, université Aix Marseille/CNRS.

Aide à la décision politique : Aquila, aider les autorités italiennes

La région de l’Aquila fut touchée le 6 avril 2009 par un séisme de magnitude 6,2 sur l’échelle de Richter. Le danger supplémentaire provenait des répliques très fortes qui se produisent durant les jours suivants. Il était donc crucial de pouvoir calculer rapidement et avec précision des scénarios de répliques possibles.

L’illustration ci-contre montre une carte de vitesse maximale du sol illustrant l’aléa sismique pour deux scénarios de répliques possibles : on voit que le premier scénario produit plus de dégâts que le deuxième.



Dimitri Komatitsch, université de Pau et des Pays de l’Adour, CNRS et INRIA.

Comment accéder aux ressources de GENCI, pour quelles ressources ?

Les conditions d’éligibilité pour les chercheurs académiques et industriels sont les suivantes :

- il est impératif qu’il s’agisse de travaux de recherche ouverte ; ce qui implique une obligation de publication ;
- le porteur de projet doit être membre permanent du laboratoire d’appartenance, avec un financement français (doctorants, post-doctorants, etc., ne peuvent pas être porteurs de projet, sauf dans le cas de la procédure « Accès dynamiques ») ;
- une sélection a lieu sur des critères d’excellence scientifique (pour les accès réguliers).

Ces conditions permettent un accès gratuit au calcul, au stockage, mais aussi aux équipes support aux utilisateurs des centres, ainsi qu’aux formations proposées par celles-ci. Il existe plusieurs types d’accès aux ressources de GENCI : accès réguliers (AR), accès préparatoires (AP) et accès dynamiques (AD). AR et AP sont les accès classiques pour le calcul HPC. AD a été mis en place en 2019 pour faciliter un accès rapide aux ressources de Jean Zay pour les chercheurs en IA : ils ne sont pas soumis à sélection par un comité. Demander un AR permet de candidater sur les trois centres nationaux en même temps : ils concernent environ 800 projets par an pour plus de 3500 utilisateurs.

Le tableau ci-dessous résume les particularités des différents accès aux ressources de GENCI.

Type d'accès	Accès Régulier	Accès Préparatoire	Accès Dynamique
But	Calcul important, mode production	Test, développement, étude d'extensibilité	Développement, d'algorithmes en IA
Quand postuler ?	Biannuel	Tout au long de l'année	Tout au long de l'année
Pour combien de temps ?	1 an	6 mois	1 an
Évaluation par un comité	Oui	Non	Non
Nombre moyen d'heures	5 Mheures-cœur	50 kheures-cœur	10 kheures-GPU

Plus de 5000 dossiers ont été expertisés depuis 2010. Parmi les projets qui se sont vus attribuer des heures sur les machines nationales, 60 % utilisent aussi un mésocentre régional ; 32 % sont soutenus par un projet ANR et près de 20 % par un industriel. Les demandes d'heures émanent de tous les domaines de recherche et sont répartis en cinq domaines comme le montre la figure 4.

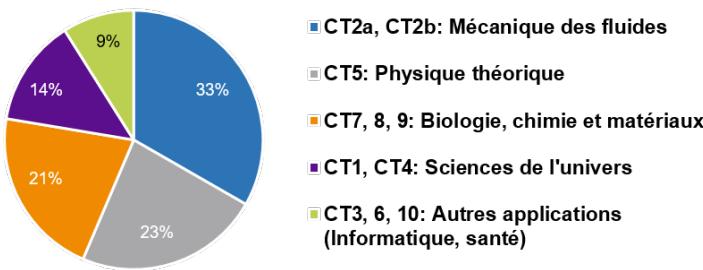


FIGURE 4. Répartition des heures demandées pour les principaux comités thématiques.

Depuis 10 ans, malgré l'augmentation régulière des moyens mis à disposition par GENCI, la demande reste plus élevée que l'offre comme le montre la figure 5. Il est donc important, pour les gros projets, de pouvoir participer aux appels d'offre européens PRACE afin de ne pas « encombrer » les demandes à l'échelle nationale. GENCI, avec son positionnement et son action à tous les niveaux (régional, national, européen), permet une gestion cohérente de ces moyens de calcul, quels que soient les besoins du projet candidat.

Le futur : l'initiative européenne pour l'Exascale

La création d'une entreprise commune, EuroHPC, signée en 2019 entre la Commission européenne et 24 pays, dont la France, acte la mise en place de budget d'un milliard d'euros et le démarrage de la mise en place d'une infrastructure de calcul et

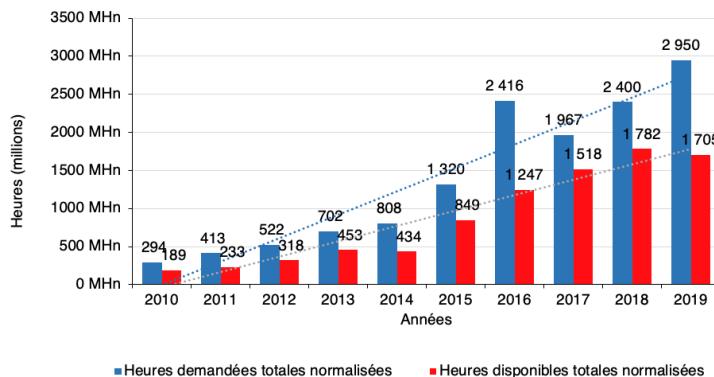


FIGURE 5. Évolution des demandes et disponibilités d'heures de calcul (en millions).

de données intégrées de classe mondiale. Le principe est d'acquérir des machines en copropriété entre l'Europe et les différents consortiums, chacun apportant la moitié du financement. Cette entreprise commune (*Joint Understanding – JU*) EuroHPC⁵ s'appuie sur les structures existantes : PRACE pour les machines (et le stockage) et GEANT pour la partie réseau. L'objectif de JU est de développer puis de mettre en œuvre des technologies et des logiciels exclusivement européens, en faisant un enjeu de souveraineté.

Dans une première phase, cinq machines multi-Petascale et trois machines pré-Exascale sont financées.

- multi-Petascale : 20 pétaFLOPS, financement à 35 %. Cinq consortiums portés par le Luxembourg, le Portugal et l'Espagne, la Slovénie, la République Tchèque, la Bulgarie.

- pré-Exascale : 150 pétaFLOPS avec des GPUs, financées à 50 %, trois consortiums :

- (1) BSC, Espagne avec le Portugal, l'Irlande, la Roumanie, la Croatie, la Turquie.

- (2) CSC, Finlande avec la Belgique, le Danemark, la Norvège, la Pologne, la Suède, la République Tchèque et la Suisse.

- (3) CINECA, Italie avec l'Autriche, la Slovaquie, la Slovénie et la Hongrie.

Dans une deuxième phase, un nouveau financement de 5 milliards d'euros sera débloqué, dont une partie servira à l'acquisition de deux machines Exascale.

5. <https://eurohpc-ju.europa.eu/>

Il reste d'ici là à inventer les modes de financement pour faire face non seulement à la moitié du coût d'acquisition, mais surtout aux coûts de fonctionnement pour les centres (consommation électrique propre, plus refroidissement). Néanmoins, la très forte capacité de calcul attendue en France, avec la machine Exascale, permettra de desserrer les contraintes, et ce d'autant plus que les besoins en capacité de calcul de certaines communautés scientifiques croissent à une vitesse soutenue alors même que d'autres commencent seulement à s'intéresser aux potentialités de la simulation numérique associée au traitement de données massives et à l'intelligence artificielle.



Intelligence artificielle 4.0 pour l'Industrie 4.0

Eunika Mercier-Laurent¹

Le contexte

La globalisation et la recherche de main d'œuvre bon marché ont changé le paysage industriel des pays développés. Pour faire face à la concurrence asiatique le gouvernement allemand a proposé le terme Industrie 4.0² en 2011 afin de promouvoir la numérisation de la fabrication, revaloriser l'industrie européenne et créer des emplois en Europe [2].

L'Industrie 4.0 (I4) représente la quatrième révolution industrielle après l'invention de la machine à vapeur, mécanisation et production de masse, informatisation et robotisation (cf. figure 1).

Alors que la plupart s'accordent pour considérer la machine à vapeur comme une invention marquante de la première révolution, on oublie le métier à tisser automatique introduit par Joseph-Marie Jacquard en 1789³. À noter au passage que cette machine utilisait la programmation à cartes.

La seconde révolution industrielle est située par les historiens entre la seconde moitié du 19^e siècle et le début du 20^e siècle. Utilisant comme ressources l'électricité et le pétrole, elle vise la croissance économique par le développement de la production et de la distribution de ces ressources, de la mécanique et de la chimie.

1. Laboratoire CReSTIC, Université de Reims Champagne-Ardenne

2. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/industry-4-0/29278>

3. <https://www.france-pittoresque.com/spip.php?article12487&fbclid=IwAR3jDdgvysoaIXI615B-fjcPw4NiAM0v-0AaucwAVQwd7WlbqM9UqKjcqA>.



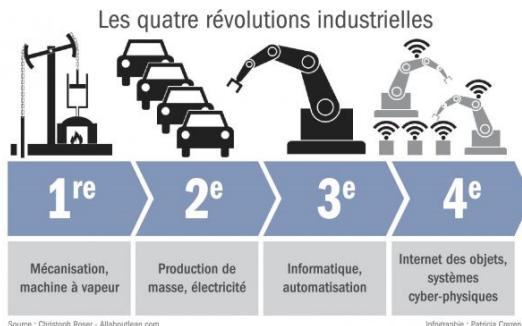


FIGURE 1. Quatre révolutions industrielles.

L’invention de la radio, du téléphone, de l’ordinateur et des réseaux de neurones date de cette époque.

Les premiers cris d’alarme sur les impacts de ce développement ayant pour seul objectif de générer des richesses matérielles pour les investisseurs ont été lancés dans les années 1960 [1].

La troisième révolution industrielle, amorcée dans des années 1970, correspond à une nouvelle étape dans l’histoire des sciences et des techniques. Elle se caractérise principalement par l’utilisation de l’énergie nucléaire, le développement de l’électronique et de l’informatique, qui rendent possibles la production de matériels miniaturisés et l’automatisation poussée de la production, la multiplication des produits de synthèse, le développement des technologies spatiales et celui des biotechnologies et de l’Internet.

Les acteurs de cette période ne se préoccupent pas des impacts générés par leurs activités, continuant à produire plus pour vendre plus. L’obsolescence programmée est bien intégrée dans la conception de produits. Les équipements électroniques et informatiques sont tristement compris dans cette démarche.

Intégrant l’informatique traditionnelle et l’IA, l’Industrie 4.0 est sensée apporter une plus grande flexibilité, une optimisation de processus de fabrication et faciliter l’innovation à toutes les étapes. La transformation de processus repose sur cinq principes fondamentaux :

- (1) Présence de réseaux des personnes, des machines et des objets connectés dans l'espace physique et virtuel.
- (2) Amélioration de l'efficacité et de la flexibilité grâce à une exploitation optimisée des données.

- (3) Amélioration de la qualité de produits et de la rapidité de leur mise sur le marché grâce aux tests en réalité augmenté et virtuelle.
- (4) Optimisation de planification, fabrication et maintenance avec des techniques IA.
- (5) Robotisation.

De manière générale Industrie 4.0 comporte la décision décentralisée, l'interopérabilité, la cyberassistance, la maintenance prédictive et l'écoconception ; elle est centrée sur l'utilisateur/client.

L'intelligence artificielle, non mentionnée sur la figure 1, est déjà fortement présente dans l'industrie et souvent « embarquée » dans des systèmes d'aide à la décision, de diagnostic, de maintenance et d'optimisation [10, 6]. D'ailleurs les systèmes embarqués (station spatiale, pilote automatique, voiture autonome, etc.) intègrent de l'IA.

Les applications de l'IA en industrie ont été exposées durant la conférence annuelle d'Avignon « Systèmes Experts et leurs applications » (1987-1994). À signaler également le groupe de travail sur les applications opérationnelles de l'Intelligence Artificielle (GTAOIA) de l'AFIA (Association Française pour l'Intelligence Artificielle), animé par Bertrand Braunschweig et Eunika Mercier-Laurent, qui a donné le jour à SSI en 1998, puis à ISAI, la première conférence sur les applications de la plate-forme AFIA en 1999. Depuis, elle est annuelle et a été renommée APIA⁴.

Le bulletin AFIA, édité depuis 1989, a abordé un certain nombre de thématiques liées aux applications industrielles, comme récemment « IA et la robotique mobile »⁵.

Quelques éléments d'Industrie 4.0

La plupart des illustrations incluses dans le cercle de la figure 2 représentent des éléments de l'Industrie 4.0 : *cloud* pour le stockage et traitement distant, *big data* et *analytics*, objets connectés, simulation, fabrication additive (*additive manufacturing*), réalité augmentée et virtuelle pour le prototypage et la formation et robotique industrielle. À celles-ci, il faut ajouter l'intégration et la cyber-sécurité.

La fabrication additive, appelée également impression 3D, désigne les procédés de fabrication par ajout de matière. Cette technique peut être utilisée dans le cycle de vie d'un produit aussi bien dans le prototypage rapide et la production que les applications d'outillage. La fabrication additive est plus particulièrement appropriée à la production de très petits composants en grandes quantités ou à la production de pièces d'une grande complexité géométrique. L'impression 3D peut également servir à produire des pièces détachées et éviter de jeter les appareils endommagés à

4. <https://www.irit.fr/pfia2019/api/>

5. https://afia.asso.fr/wp-content/uploads/2019/04/104_avr19.pdf

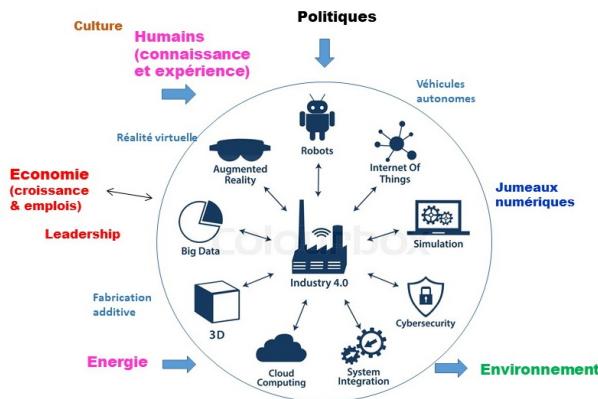


FIGURE 2. Quelques éléments de l'industrie 4.0 (dans le cercle).
 Source : monicaodo-stock.adobe.com. Ajouts Eunika Mercier-Laurent.

condition que le prix d'impression et de remplacement soit inférieur au prix de l'appareil neuf. Les pièces à reproduire peuvent être scannées. Bien que le terme intelligence artificielle ne soit pas mentionné, on y devine des classiques de l'IA comme les robots avec vision artificielle, les capteurs, le traitement du signal, de la voix, de l'image, la fouille de données, les diagnostics (plusieurs techniques possibles) et la simulation.

On notera également que les drones sont utilisés aujourd'hui pour l'observation (caméra, analyse de l'image), pour une action de prévention (déttection de fissures) ou de réparation (Fukushima). L'industrie de guerre utilise des mini-drones équipés de reconnaissance faciale et d'une charge d'explosif.

La conception de produits est bien intégrée dans I4 ; le *design thinking* et l'écoconception font de plus en plus partie intégrante du cycle de développement [11]. Au départ de cette tendance, les entreprises ont surtout travaillé sur la conformité à la norme ISO 26000 et les éco-designers sur le recyclage des produits en fin de vie. Maintenant, les responsables du développement durable interviennent aux côtés des concepteurs pour minimiser par tous les moyens l'impact environnemental de leurs innovations. Encore ici la simulation au amont avait un grand rôle à jouer. Cette écoconception en informatique n'en est qu'à ces balbutiements.

Deux ajouts par rapport à la figure 2 :

(1) Éléments qui font maintenant partie de l'IA, comme les clones virtuels, les systèmes cyber-physiques et les co-bots, qui tirent leur nom de la contraction des termes anglais *collaborative robots*. Ces robots d'un nouveau genre ont la particularité de travailler en collaboration avec un humain, dopant sa productivité en le délestant des missions les plus ingrates, éprouvantes et répétitives ;

(2) Éléments extérieurs indispensables pour le bon fonctionnement d'I4.

Le clonage virtuel (*digital twin* ou jumeau numérique) est un modèle numérique de comportement physique d'un équipement, comme par exemple une ligne de production. Ces outils sont très utile pour vérifier la commande d'un équipement avant sa mise en service, pour prévoir des incidents ou des pannes avant qu'elles n'apparaissent ou encore pour étudier la fiabilité de composants mécaniques exposés à des conditions extrêmes.

Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacité de calcul, en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau. Le principe est présenté sur la figure 3.

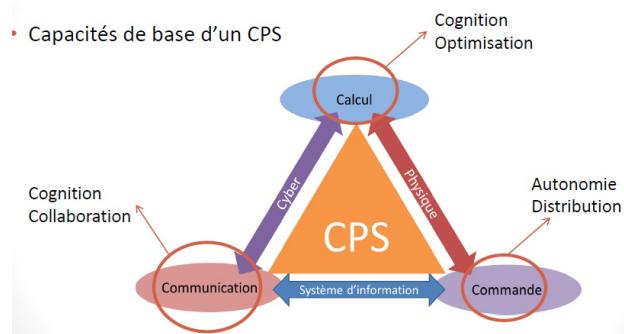


FIGURE 3. Systèmes cyber-physiques (CPS)⁶.

Alors que Lee, Bagheri et Kao [4] décrivent plusieurs niveaux de CPS (cf. figure 4), ce qui nous intéresse ici du point de vue l'IA sont les niveaux C3 (apprentissage système), C4 (autodiagnostic) et C5 (auto-adaptation).

Les co-bots, présents dans les usines du futur, ont pour principe de collaborer avec des opérateurs humains via en général des écrans tactiles.

6. http://ims2.cran.univ-lorraine.fr/sites/ims2.cran.univ-lorraine.fr/files/inline-files/Olivier_Cardin-les_CPPS.pdf

- **C1.** Au niveau **Connexion**, le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs ;
- **C2.** Au niveau **Conversion**, le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau ;
- **C3.** Au niveau **Cyber**, le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information ;
- **C4.** Au niveau **Cognition**, le CPS est capable d'établir un diagnostic basé sur des simulations de son propre comportement et une analyse différentielle des données de capteurs ;
- **C5.** Au niveau **Configuration**, le CPS peut s'adapter seul en cas de défaillance, se reconfigurer ou ajuster de manière autonome ses paramètres afin de retourner à un comportement nominal.

FIGURE 4. Les différents niveaux de CPS selon [4].

À gauche de la figure 2, il y a des éléments à prendre en compte (connaissance du contexte) pour le bon fonctionnement de l'ensemble. Bien que les personnes soient considérées comme partie intégrante de l'I4, leurs connaissances et expériences ne sont pas suffisamment exploitées, car la mode est aux données. L'environnement multiculturel généré par la mondialisation peut enrichir le système, mais aussi le freiner. Les politiques imposées par les gouvernements prennent maintenant en compte l'impact de l'I4 et l'IA. De plus, le système a besoin de l'énergie pour fonctionner ; l'efficacité énergétique est intégrée dans quelques usines du futur.

L'impact environnemental est encore faiblement pris en compte via la norme ISO 26000. Des lignes directrices pour aider les organismes à établir, documenter, mettre en œuvre, tenir à jour et améliorer en permanence leur management de l'éco-conception sont fournies par l'ISO 14006 :2011. Cependant, cet impact doit être considéré tout au long du processus de l'innovation, l'impact de l'informatique y compris [6, 7].

L'usine intelligente ou l'usine du futur (*Smart Factory*) est considérée comme le déclencheur de la quatrième révolution industrielle. En effet, la digitalisation massive, mode au *big data* et leur exploitation par entre autre le *deep learning* sont parmi les éléments fondateurs. L'usine Schneider de Vaudreuil⁷ et celle de Safran sont exemplaires en ce qui concerne le déploiement des principes de l'I4 et l'utilisation généralisée de l'IA.

Intelligence artificielle – de 3.0 à 4.0

Bien que le déclencheur de la nouvelle vague de l'IA a été le marketing et le leitmotiv de vendre plus et au plus grand nombre, les techniques pour explorer le *big data* sont bien connues par la communauté de l'IA sous le nom « fouille de

7. <https://www.youtube.com/watch?v=N0tnFyZC4bs>

données ». Le *machine learning* est omniprésent et très galvaudé, alors que la science du *machine learning* remonte aux années 1970. L'année 1995 a apporté un concept de *tool box* composé d'un ensemble des techniques existantes, appelé *Multi-strategy Machine Learning* [8].

Cap Digital⁸ constate : « Cette nouvelle vague de l'intelligence artificielle cultive une volonté de s'approcher voire d'augmenter et améliorer nos fonctions humaines. Les interfaces deviennent plus naturellement « humaines » et rentrer en contact avec des machines n'a jamais été aussi intuitif. L'interface tactile est d'ores et déjà une norme, la voix tend à devenir un nouveau canal de contrôle pour la maison par exemple. La machine et l'humain tendent à se fondre et se confondre, à s'interpeller l'un l'autre pour s'enrichir mutuellement ».

Dans cette effervescence, on oublie que l'IA a plus de 60 ans et offre un ensemble d'approches et de techniques pour traiter efficacement la plupart des problèmes complexes auxquels nous devons faire face actuellement (cf. figure 5).

Tout cet éventail des techniques intègre également celles associées à la modélisation et au traitement des connaissances (et d'expériences) – le chaînon manquant dans la troisième vague. Résoudre des problèmes industriels complexes impose la combinaison de plusieurs techniques dans des systèmes hybrides [3]. Les SMA (systèmes multi-agents) encapsulent déjà quelques techniques (spécialisation des agents). John Launchbury (DARPA) prédit la nouvelle génération de l'IA combinant les techniques numériques avec celles du traitement de connaissances⁹.

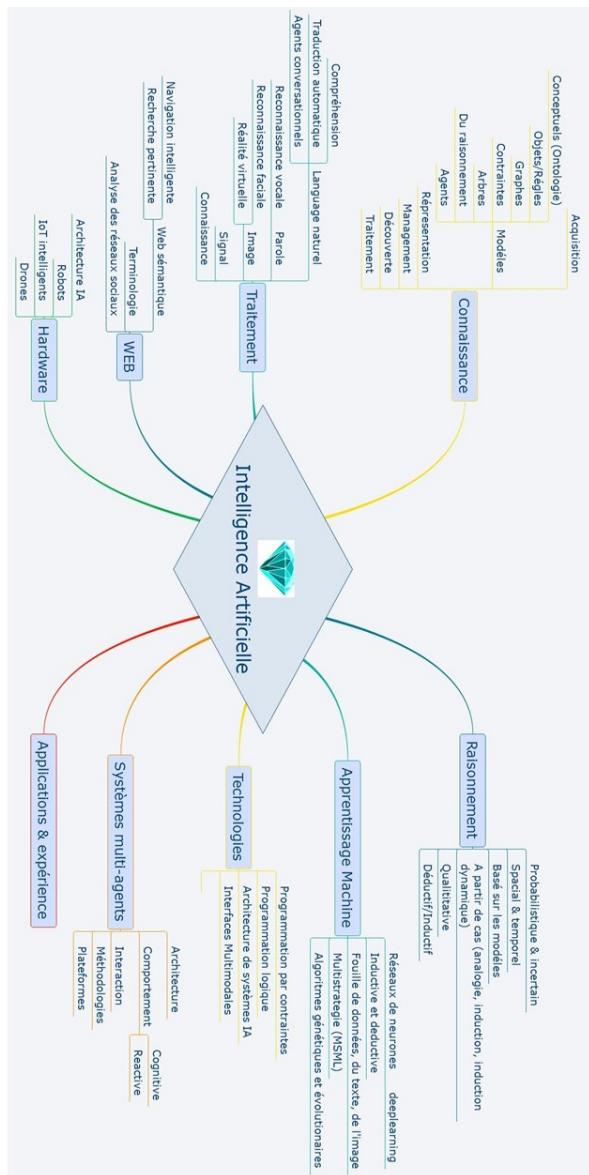
C'est cette IA 4.0 combinant les techniques liées au traitement des connaissances et la découverte d'information (appelée à tort « connaissance ») de *big data* qui rend des vrais services à l'Industrie 4.0.

Décortiquons la vision de Vinci énergies : « En étant connectées entre elles, les machines sont capables de produire intelligemment. Dans les faits, cela se retrouve sur de nombreux points, par exemple :

- Une production plus flexible qui permet de s'adapter à la demande en temps réel (programmation par contraintes).
- Une traçabilité poussée, qui permet de savoir où et quand a été fabriqué le produit, mais aussi comment. À cela s'ajoutent des contrôles de sécurité tout au long de la fabrication, qui permettent de rappeler un produit en cas de défaillance, de manière ciblée et plus rapidement (reconnaissance de formes).
- Des machines capables de contacter un spécialiste apte à les dépanner à distance (déjà vu en 1996 chez Darty avec du CBR, accès aux bases d'expériences), ou pour se mettre à jour et améliorer leurs performances, grâce à Internet (diagnostic).

8. <https://www.capdigital.com>

9. <https://www.youtube.com/watch?v=-001G3tSYpU>



Eunika Mercier-Laurent, 2019

FIGURE 5. Principales techniques de l'intelligence artificielle (Eunika Mercier-Laurent).

- Une scénarisation du cycle de production grâce à laquelle la fabrication est pilotée en fonction du client et qui est capable de personnaliser le produit (taille, couleur, type d'emballage...), (modélisation par scenario – Shank, 1990 mais aussi CBR, Legrand).
- Une optimisation des consommations par l'efficacité énergétique : la production est optimisée en fonction du coût de l'énergie et de sa disponibilité au cours d'une journée, lorsqu'elle est moins chère ou lorsque les énergies alternatives sont utilisables. Une mise hors tension des machines est également effectuée si elles n'ont pas besoin de fonctionner. Les remontées d'informations peuvent aider à optimiser les consommations et participent ainsi à l'efficacité énergétique de l'usine (système hybride combinant systèmes experts, Bayésien et réseaux de neurones [3]). »

Les problèmes complexes ne peuvent pas être résolus avec une seule technique, comme les médias semblent le faire croire aujourd'hui. Par exemple, les systèmes de vision industrielle utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'agroalimentaire, de l'emballage, du médical et de l'industrie pharmaceutique mettent en œuvre à la fois des composants matériels et logiciels, tels que l'éclairage, les lentilles, les capteurs et les équipements de communication et d'analyse de données, tâches d'identification, contexte d'automatisation de la production, les systèmes de guidage des robots.

Les chercheurs et les praticiens de l'intelligence artificielle ont inventé et expérimenté un éventail d'approches et de techniques qui permettent aujourd'hui de faire face aux défis à condition de savoir penser sans frontières entre les domaines.

Dans nos laboratoires de recherche

Les industriels se regroupent, créent des consortiums internationaux pour proposer des solutions couvrant l'ensemble des problématiques liées à l'I4. Siemens a créé MindSphere, une plateforme IoT ouverte couvrant les besoins des entreprises, les logiciels comme Astree, Aquiweb et bien d'autres ont été présents au salon Smart Industrie à Lyon en 2019.

Les laboratoires travaillent sur tous les sujets mentionnés précédemment. Parmi eux, on peut citer le LORIA, le GEI (INSA), le LAAS, le LIRMM¹⁰, l'université de Poitiers¹¹. Parmi les thèmes de recherche, il y a le traitement du signal et des images, le *data mining* et le *machine learning*.

Les modèles de connaissance complètent efficacement ces modèles mathématiques et le traitement de connaissances apporte une plus-value dans de nombreux cas.

10. <http://www.lirmm.fr/~reitz/di-marel/20160219-expose-GL-SCP.pdf>

11. <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/systeme-cyber-physique/>

L'intégration des capteurs en réseau, avec des systèmes de calcul et des moyens de télécommunication embarqués, en tant qu'organes actifs et intelligents, permet d'améliorer la surveillance, le diagnostic et la maintenance automatique des systèmes.

Parmi les projets rapprochant les mondes de l'IT (*Information Technology*) et de l'OT (*Operational Technology*), on peut par exemple citer les systèmes d'aide à la décision pour les opérateurs de production, le diagnostic en ligne des systèmes automatisés de production utilisant le raisonnement par analogie et l'intégration de l'humain au cœur de l'industrie du futur.

A l'étranger, les chercheurs de Fraunhofer travaillent sur l'optimisation des ressources pour la fabrication (machines de fabrication, robots, systèmes de convoyeurs et d'entreposage et installations de production) autonomes, capables d'auto-contrôle en réponse à différentes situations, auto-configuration, intégration de connaissances, équipés de capteurs spatiaux et qui intègrent également les systèmes de planification et de gestion¹².

Au Danemark¹³, les chercheurs travaillent sur les jumeaux numériques impliquant la fouille de données provenant d'éoliennes en mer, en collaboration avec des simulateurs pour la maintenance prédictive. En Hongrie, la laboratoire MMTDI-Szechenyi Istvan University Győr travaille sur les systèmes cyberphysiques (travaux de Josvai Janos, Cristina Monsone [9]).

En 2016, l'Union européenne a investi 50 milliards d'euros dans la recherche européenne en I4 intelligent. Cette investissement a généré quelques résultats probants et même des plateformes en Italie, Autriche, Hongrie¹⁴. En Chine et en Corée, I4 a été introduit directement dans des usines¹⁵. L'article de L. Wang et G. Wang donne un bon aperçu sur l'I4 aux États-Unis [5].

Conclusion

Une collaboration plus étroite entre les centres de recherche et les industriels sur les défis possés par l'Industrie 4.0, renforcée par de l'IA bien ciblée serait bénéfique pour tous.

Nos laboratoires sont un gisement d'inspiration et d'idées, mais les défis industriels bien que parfois ardu斯 peuvent constituer plusieurs sujets de thèses multidisciplinaires et communicants à l'instar de réseaux I4 (association de compétences, comme par exemple <https://www.openindustry4.com>).

12. <https://www.fraunhofer.de/en/research/fields-of-research/production-supply-of-services/industry-4-0.html>

13. <https://www.dtu.dk/english/research>

14. <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/tags/industry-40>

15. <https://www.innovationiseverywhere.com/industry-4-0-asia/>

L'IA en France est particulièrement riche, mais mal connue à l'international et pas suffisamment « industrialisée ». Son plus grand défi est la reconnaissance à l'international via les grands événements. Le rapport collaboratif de Cédric Villani n'est pas traduit en anglais.

Le défi pour l'informatique ne tient pas uniquement en la performance de machines, la compression et le stockage, mais en l'intelligence intégrée (*green software*, liens à la place de stockage de milliards de photos, d'enregistrements vidéo). En 1996, nous avons proposé le web indexé par des modèles de connaissances, mais on a préféré juste générer les données.

L'Internet du futur est à inventer. Enfin, *Green et smart software* pour diminuer l'impact environnemental de l'informatique sont fortement souhaités, ainsi que l'innovation en sécurité.

Références

- [1] Erik P. Eckholm. Losing ground : Environmental stress and world food prospects. *Environmental Conservation*, 3(2), 1976.
- [2] Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster, and Johannes Helbig. *Recommendations for implementing the strategic initiative*. Industrie 4.0 : Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- [3] Mercier-Laurent Eunika Kayakutlu Gulgur. *Intelligence in Energy*. Elsevier, 2017.
- [4] Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3 :18 – 23, 2015.
- [5] Wang Lidong and Wang Guanghui. Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 6(4) :1–8, 2016.
- [6] Eunika Mercier-Laurent. *Les écosystèmes de l'innovation*. Lavoisier, 2011.
- [7] Eunika Mercier-Laurent. *The Innovation Biosphere. Planet and Brains in Digital Era*. John Wiley & Sons, 05 2015.
- [8] Ryszard Michalski and George Tecuci. *Machine Learning*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [9] Cristina Monsone, Eunika Mercier-Laurent, and Jósvai János. The Overview of Digital Twins in Industry 4.0 : Managing the Whole Ecosystem. In *11th International Conference on Knowledge Management and Information Systems*, pages 271–276, Vienna, Austria, September 2019. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
- [10] Wendy B. Rauch-Hindin. *Artificial Intelligence in Business, Science, and Industry. Vol. II : Applications*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1985.
- [11] Feng Zhang, Maud Rio, Romain Allais, Peggy Zwolinski, Tatiana Reyes Carrillo, Lionel Roucoules, Eunika Mercier-Laurent, and Nicolas Buclet. Toward an systemic navigation framework to integrate sustainable development into the company. *Journal of Cleaner Production*, 54 :199 – 214, 2013.

MA THÈSE EN 1024 CARACTÈRES



Rappel des conditions de soumission

Le comité de rédaction

Cette nouvelle rubrique de 1024 a pour objectif de permettre aux doctorants en fin de thèse, ou aux docteurs ayant soutenu depuis moins de six mois, de présenter un résumé de leurs travaux de thèse. Il devra naturellement s'agir d'une thèse en informatique (27e section du Conseil national des universités – CNU), préparée au sein d'un laboratoire de recherche français, éventuellement en cotutelle avec un laboratoire étranger.

Le résumé devra contenir exactement 1024 caractères (espaces non comprises) et être rédigé en langue française, sans formule mathématique ni figure. L'auteur veillera à ne pas utiliser d'abréviations non standards sans les avoir préalablement définies. Les informations complémentaires (auteur, titre, encadrants, laboratoire, entreprise le cas échéant, date de soutenance si la thèse a été soutenue, etc.) ne seront pas considérées dans ce décompte.

Les propositions, au format texte, devront être envoyées à

1024@societe-informatique-de-france.fr.

Un comité de lecture évaluera leur qualité et vérifiera qu'elles respectent les règles énoncées précédemment. Pour montrer la faisabilité de l'exercice, nous les avons nous-même respectées dans cette présentation.



Algorithmes de bandits multi-joueurs pour les réseaux de l'Internet des objets

*Lilian Besson*¹

Pour ma thèse, à CentraleSupélec à Rennes et Inria à Lille, j'ai étudié l'impact de l'apprentissage par renforcement, de type bandits multi-bras, utilisé par des objets de l'Internet des Objets, reconfigurables dynamiquement et opérant comme des radios intelligentes sans coordination et en bandes non licenciées.

J'ai proposé deux modèles de réseaux, avec ou sans retransmissions, pour lesquels j'ai développé des simulations numériques et une validation expérimentale réaliste. Nous avons pu montrer que la durée de vie des batteries et l'efficacité des réseaux peuvent être améliorées, si les appareils suivent de bons algorithmes de bandit, un apprentissage machine efficace et peu coûteux, pour optimiser automatiquement leur accès au spectre radio et l'efficacité de leurs communications sans fil.

Ces problèmes d'accès au réseau sont modélisés par des bandits multi-bras, multi-joueurs et non-stationnaires, mais sont trop difficiles à analyser, donc la suite de ma thèse étudie deux modèles restreints : des bandits multi-joueurs stationnaires, ou mono-joueurs non stationnaires.

J'ai aussi écrit la bibliothèque [GitHub.com/SMPyBandits](https://github.com/SMPyBandits) en Python pour simuler ces problèmes de bandits.

Détection et classification fines d'actions à partir de vidéos par réseaux de neurones à convolutions spatio-temporelles, application au tennis de table

*Pierre-Étienne Martin*²

Ma thèse porte sur la reconnaissance des gestes sportifs à partir de vidéos et j'applique mes travaux au tennis de table.

1. Thèse soutenue le 20 novembre 2019, préparée au sein de CentraleSupélec Rennes et de l'Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes (IETR), sous la direction de Christophe Moy (Université Rennes 1 et IETR) et Émilie Kaufmann (CNRS, CRISTAL et Inria Lille).

2. Thèse dont la soutenance est prévue en novembre 2020, préparée au sein du Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LaBRI), sous la direction de Jenny Benois-Pineau (LaBRI, Université de Bordeaux) et Renaud Péteri (MIA, La Rochelle Université).

Le but est de programmer un environnement informatique intelligent sur lequel étudiants et enseignants peuvent analyser la façon de jouer des sportifs. Le logiciel permet de segmenter et de classifier automatiquement les coups de tennis de table effectués par les joueurs à partir de vidéos. Ainsi le profil des joueurs peut être renseigné et l'enseignant peut adapter son cours pour améliorer au mieux leurs performances.

Pour ce faire, nous avons enregistré des jeux de tennis de table avec des étudiants. Ces enregistrements ont ensuite été annotés temporellement par des professionnels sur une plateforme participative d'annotation. Cette nouvelle base de données, surnommée TTStroke21, nous permet d'entraîner et de tester notre modèle. On introduit un réseau de neurones jumeau à convolutions spatio-temporelles prenant en entrée le flux vidéo et le flot optique. Traitées parallèlement, ces données permettent une classification efficace des segments de vidéos. À partir de ces classifications les frontières temporelles des coups effectués et leur classe sont renseignées.

Schémas d'induction : de la séparation de langages à la coloration de graphes

Théo Pierron³

L'induction structurelle est un outil puissant de preuve en mathématiques. Dans ma thèse, j'étudie plusieurs types d'inductions, en théorie des graphes et des langages.

Un des résultats majeurs de théorie des graphes est le théorème des quatre couleurs. Ce résultat de coloration est obtenu à l'aide de la méthode de déchargement. Elle consiste à définir un schéma d'induction adapté à la fois à la classe de graphes considérée, et à la propriété à prouver. J'utilise des variantes de cette méthode pour étudier d'autres problèmes de coloration.

En théorie des langages, un problème majeur consiste à tester l'appartenance d'un langage à une classe donnée. Décider ce problème revient à comprendre l'expressivité de cette classe. Parfois, on peut se ramener à étudier une classe plus restreinte, à condition de résoudre un problème plus général, appelé séparation.

Pour résoudre ce problème, une approche classique consiste à générer des témoins d'inséparabilité à partir de témoins déjà connus. Ceci revient à élaborer un algorithme de point fixe spécifique à chaque classe. Étudier ce type d'algorithmes

3. Thèse soutenue le 8 juillet 2019, préparée au sein du Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LaBRI), sous la direction de Marthe Bonamy, Éric Sopena et Marc Zeitoun.

permet alors d'obtenir des résultats de complexité et de décidabilité pour des classes plus générales.

Évaluation de l'effectivité des systèmes ambiants

Gérald Rocher⁴

Les systèmes ambiants, fusion des mondes physiques et numériques, permettent de recueillir un grand nombre de données dont l'analyse suggère la mise en œuvre d'actions pertinentes au sein de nos environnements. Les perspectives économiques et sociétales sont immenses mais l'humain n'étant pas en mesure de faire face à ce flot d'information, l'automatisation d'une partie de ces actions s'impose dès lors à lui. Pourtant, les systèmes ambiants sont complexes, ils n'autorisent pas de prédire complètement les effets de leurs actions. Les risques liés à leur automatisation sont donc très importants et celle-ci doit absolument s'accompagner de garde-fous.

Dans ce contexte, l'approche de modélisation systémique est mise en œuvre afin de modéliser les finalités de ces systèmes et les tolérances associées. Ainsi, à défaut de prédire les effets de leurs actions, il s'agit d'évaluer leur effectivité, l'adéquation entre les finalités et les résultats observés, l'humain restant au cœur des préoccupations.

Une formalisation de la notion d'effectivité est proposée dans le cadre de la théorie de la mesure et appliquée à un ensemble de mesures. Les résultats obtenus ouvrent de nombreuses perspectives.

4. Thèse soutenue le 10 février 2020, préparée au sein du Laboratoire d'informatique, signaux et systèmes de Sophia-Antipolis (I3S), sous la direction de Nhan Le Thanh et Jean-Yves Tigli, et financée par GFI Informatique, direction de l'innovation.

MEMBRES D'HONNEUR 2020



Claude Girault

Professeur émérite, Sorbonne Université, LIP 6



Je remercie vivement mes collègues et le Conseil d'administration de la Société informatique de France pour m'avoir nommé membre d'honneur. Ancien président de SPECIF et ancien secrétaire général de l'ASTI, j'apprécie beaucoup cette opportunité de vous rencontrer durant ce congrès.

Le livre de M. Kraitchik « La mathématique des jeux » me passionna pour les calculs de probabilités, les dénominations, les problèmes de cheminement, initiations qui me motivèrent bien plus tard pour intégrer l'Institut de statistiques de l'université de Paris. J'eus ainsi le bonheur de suivre les cours de graphes de C. Berge, de programmation linéaire de J. Abadie, et de processus stochastiques de R. Fortet. Les tests statistiques s'évaluaient alors avec des machines à manivelle, certes améliorées de celle de B. Pascal. La réaction fut de suivre le certificat de calcul automatique de J. Ville pour lequel j'ai programmé sur CAB 500 la minimisation formelle de fonctions booléennes.

En 1962, le CNRS confia la direction de l'Institut Blaise Pascal (IBP) au bourbakiste R. de Possel, aidé de A. Lentin et de L. Nolin. L'IBP fut doté d'une IBM 704, destinée aux calculs des divers laboratoires, mais elle me permit aussi de construire des treillis et de rechercher des cliques pour des sociologues. R. de Possel introduisit une option informatique dans le DEA d'analyse numérique, et la première chaire d'informatique fut attribuée à J. Arsac, normalien et astronome. L'IBP fit éclore des séminaires où professèrent entre autres M.P. Schützenberger, J. Pitrat, F. Genuys, R. Jaulin, M. Gross.



J. Arsac et L. Nolin créèrent, en 1963, l’Institut de programmation de Paris (IP). Il délivrait trois diplômes annuels successifs (programmeurs d’applications, programmeurs d’études, experts) et attira vite un total de plus d’un millier et demi d’élèves. J. Arsac osa le choix, non conventionnel, d’un ordinateur NCR Elliott 803 muni du compilateur Algol 60 (programmé par C.A.R. Hoare !), son cours d’algorithmique en Algol était enthousiasmant.

Nommé assistant, j’encadrais les quelques 200 programmeurs d’études. Puis, militaire à la direction des recherches et moyens d’essais (DRME), j’eus à expertiser des contrats que soumettaient les universités mais j’eus aussi du temps pour préparer une thèse, proposée par M.P. Schützenberger, sur la recherche de permutations satisfaisant des contraintes. L’IP obtint un N.C.R. Elliott 4130 pour lequel je soutins en 1972 une thèse d’état sur la réalisation d’un système de temps partagé. Je devins professeur et directeur adjoint de J. Vignes. La charge d’enseignement disproportionnée de l’IP, vu ses moyens humains et matériels, fut allégée lorsque le MEN créa, en 1966, de nombreux IUT et maîtrises d’informatique. Après bien des blocages dus aux contraintes de politique industrielle du gouvernement, l’IP obtint enfin de nouveaux ordinateurs (DPS 8, CDC 3600, Bull 10070 avec Multics et Unix) et surtout des postes, mais après une longue grève. Des cours novateurs furent créés avec la coopération dévouée de personnalités extérieures : systèmes et réseaux par L. Pouzin (IRIA), bases de données par M. Rocher (Bull), Simula 67 par C. Cazala (*Control Data*), recherche opérationnelle par R. Faure (RATP) qui susciteront de nouveaux thèmes de recherches.

En 1975, j’ai créé, au CNRS, l’équipe de recherches associées de méthodologie et architecture des systèmes informatiques (MASI), puis, en 1981, le DEA de systèmes informatiques, avec le CNAM et l’ENST. J’ai initié des recherches sur la réalisation de systèmes de répartition de tâches et la tolérance aux fautes pour des réseaux de Suns (B. Folliot, P. Sens). Les réseaux de Petri devinrent mon axe favori de recherches, tant pour l’étude de leurs propriétés théoriques que pour la modélisation et la vérification de système. Une plate-forme facilitant l’intégration de nouveaux outils et le prototypage (P. Estrailleur, J.L. Mounier, F. Kordon) est maintenant exploitée par la communauté internationale. Des coopérations, européennes et industrielles aboutirent à trois livres et à des contrats européens (Esprit, Eureka, Capital humain et mobilité). Invité dans des laboratoires étrangers, j’y ai analysé les cohérences d’accès pour des architectures parallèles : caches multiprocesseurs (avec J.-L. Baer à Seattle), mémoires réparties à accès non uniformes (avec Z. Vranesic à Toronto), mémoires distribuées partagées (avec W. Zwaenepoël et K. Fisler à *Rice University*). J’ai aussi contribué à concevoir un pipeline pour l’apprentissage de réseaux neuronaux (avec G. Dreyfus à l’ESPCI et A. Petrowski), et reconfigurer des réseaux optiques en cas de défaillances (J.-T. Calvet à Alcatel).

Les recherches du MASI et les cours du DEA concernèrent la parallélisation (G. Roucaïrol, P. Feautrier, S. Petitot), les systèmes répartis (M. Shapiro), l'ordonnancement multimachines (Ph. Chrétienne, C. Carlier), les bases de données (G. Gardarin, C. Rolland), les réseaux et l'évaluation de performances (G. Pujolle, S. Fdida, E. Horlait), la microélectronique (G. Noguez, D. Etiemble, A. Greiner). Nous accueillîmes de nombreux chercheurs internationaux. En 1993, la fusion du LAFORIA (laboratoire de reconnaissance des formes et intelligence artificielle), du MASI et de la partie UPMC du LITP (laboratoire d'informatique théorique et programmation) édifica l'actuel LIP6 qui regroupe, maintenant, plus de 500 chercheurs. De même, tout un ensemble de formations doctorales et de laboratoires furent associés dans l'école doctorale EDITE. Avec G. Pujolle, nous avons créé, en 1989, un pôle de formation d'ingénieurs par la recherche technique (FIRTECH) « systèmes et télématique » associant des établissements publics et des industriels. Il a organisé plusieurs conférences et un congrès avec la NSF. Il a permis d'acquérir un multiprocesseur pour l'antenne de Paris VI à Versailles.

Pour répondre à un appel du MEN, en 1982, nous avons créé (avec M.F. Le Roch, M. Cheminaud et G. Nowak) un DESS « compétences complémentaires », qui bien que restant destiné aux élèves issus d'autres disciplines, était original par sa spécialisation au niveau « ingénierie des systèmes informatiques ». L'appel du MEN ne visait que l'informatique de base, mais vu les demandes industrielles et pour assurer aux diplômés des carrières pérennes, nous avons haussé les prérequis informatiques pour focaliser les cours sur les connaissances avancées et la réalisation pratique d'applications réparties sur des réseaux de Suns. En 1988, j'ai aidé E. Genebe et S. Fdida pour créer, avec les universités Paris V, Paris VI et l'ENPC, le magistère informatique de l'Île-de-France pour lequel j'ai enseigné et participé au comité de direction.

Près de 50 % des docteurs que j'ai encadrés ou coencadrés avec passion (72 thèses et 18 HDR) sont devenus enseignants ou chercheurs en France et à l'étranger. Cette dispersion, en raison de notre faible nombre initial de directeurs de thèses, était utile pour former de futurs enseignants. Par réciprocité, j'ai participé à 230 jurys de thèses et 45 HDR d'où beaucoup de rapports. J'ai assuré pendant quatre ans la présidence de la commission des thèses en informatique de l'UPMC.

J'ai participé au comité de la revue informatique de l'AFCET, à une trentaine de comités de conférences, au *Petri nets steering committee*, au WG 10.3 (*parallel processing*) de l'IFIP puis été vice-président du TC 10 (*computer technology*). J'ai été membre de comités de direction de plusieurs laboratoires et de commissions de spécialistes, conseiller informatique au MEN et à l'Association nationale de recherche et technologie (ANRT). Le rôle des sociétés savantes AFCET, SPECIF, ASTI, SIF a été crucial pour faire comprendre nos enjeux et problématiques à nos tutelles et au

public, pour obtenir, entre autres, des évolutions majeures et adéquates, d'abord des formations universitaires puis de celles destinées aux lycées et collèges, et aux futurs enseignants. Grand merci à vous, membres de la SIF, pour vos engagements et vos succès.

MEMBRES D'HONNEUR 2020



Aurélie Jean

Docteur en Sciences et entrepreneur



À travers ces quelques lignes, je voulais vous remercier chaleureusement de m'avoir choisie pour devenir membre d'honneur de la Société informatique de France.

Je suis très honorée par cette nomination car elle s'aligne avec ce en quoi je crois et ce pour quoi je travaille et m'engage, à savoir une meilleure compréhension par tous des sciences informatiques, mais également de leur application dans toutes les disciplines.

En effet, j'ai commencé par une formation en maths et en physique dans laquelle j'ai découvert les sciences informatiques en deuxième année de Licence. J'ai continué mes études en mécanique numérique des matériaux où les sciences informatiques ont été une matière importante pour permettre la résolution numérique de problèmes de mécanique du solide, souvent complexes.

Je crois en l'utilisation des sciences informatiques dans de nombreuses disciplines et pour de nombreux problèmes. J'ai moi-même appliqué les sciences informatiques à l'ingénierie, la médecine, la finance ou encore l'éducation. C'est pourquoi, avoir un membre d'honneur de la Société informatique de France, qui a un doctorat en mécanique numérique des matériaux est un signe fort selon moi. Un signe que les sciences informatiques sont partout, et que nous devons réfléchir de manière transversale. J'aime dire qu'en plus de la réflexion logique qui nous est chère, nous devons construire notre réflexion analogique. Pour pouvoir appliquer nos connaissances, nos modèles et nos travaux à des problèmes d'origines différentes et dans des disciplines variées.



Je travaille autant que je peux à la transmission au plus grand nombre de ce que sont les sciences informatiques. J'ai commencé alors que je conduisais ma recherche postdoctorale dans le domaine médical. Je travaillais sur la modélisation numérique du comportement du cerveau afin de comprendre les mécanismes du traumatisme crânien.

J'ai toujours aimé écrire sur ce que les sciences informatiques nous permettent de faire : simuler numériquement, à l'aide d'un modèle mathématique, de sa traduction algorithmique et de son implémentation dans un code informatique, les phénomènes de la réalité. En passant par le monde virtuel numérisé, on peut prédire des phénomènes, mais aussi mieux les comprendre. Qu'ils soient médicaux, financiers, sociologiques, ou encore physiques, la compréhension de ces phénomènes présente parfois certaines limitations dans le monde réel. On doit alors passer dans le monde virtuel numérisé pour les capturer, et les sciences informatiques sont alors notre meilleur allié.

La Société informatique de France encourage les actions qui permettent de faire découvrir les sciences informatiques à tout le monde. Je suis admirative du travail de nombreux de vos membres dans l'explication et la vulgarisation de cette discipline auprès du plus grand nombre. J'ai par exemple découvert le blog Binaire dans le journal Le Monde, qui est un bel exemple de ce qui se fait concrètement pour faire connaître les sciences informatiques et inspirer les futures générations à aller dans cette voie. De telles initiatives sont nécessaires voire fondamentales, pour créer un momentum autour de cette matière encore trop peu connue des jeunes et des moins jeunes.

Aujourd'hui plus que jamais, nous sommes face à deux grands défis à la fois scientifiques, sociétaux et économiques. Tout d'abord, nous avons besoin d'attirer encore plus de talents dans les métiers des sciences informatiques. Dans tous les domaines, que ce soit le web, les infrastructures, la cybersécurité ou encore le calcul. Il est également important pour ne pas dire critique de construire un écosystème de talents diversifié dans ces domaines. De manière pragmatique, les sciences informatiques ont besoin autant d'hommes que de femmes pour construire des outils et des méthodes inclusives. Nous devons former les prochaines générations mais également attirer un grand nombre de jeunes vers ses filières, et cela intervient entre autres en classe de première dans le choix des options. Le travail de mise en avant des sciences informatiques réalisé par la Société informatique de France, est fondamental dans l'attraction des jeunes étudiants vers ses filières. Je pense bien évidemment au programme « Un scientifique, une classe » qui est une des nombreuses actions dans ce sens. On ne peut devenir que ce que l'on voit. Ce programme est donc très important pour élargir le champ des possibles chez les plus jeunes, garçons et filles, et leur montrer des rôles modèles dans lesquels ils peuvent se reconnaître.

Un autre défi, et non des moindres, est le développement de la confiance dans les sciences informatiques, chez les individus.

Les sciences informatiques sont le poumon de l'intelligence artificielle et donc de tous les sujets parfois maladroitement débattus dans les médias ou chez les citoyens par exemple. Je crois qu'une culture plus large des sciences informatiques chez le citoyen lui permet de gagner sa liberté face aux technologies, mais aussi face aux nombreuses discussions. Fournir une grille de lecture aux individus est un moyen de regagner leur confiance dans les scientifiques mais aussi dans les sciences et en particulier les sciences informatiques.

En tant que nouveau membre d'honneur de la Société informatique de France, je vais travailler encore davantage à faire connaître cette science auprès du plus grand nombre, à en parler aux élèves, aux étudiants, aux parents, mais aussi aux décideurs économiques et politiques. Je vais également continuer à démontrer la transversalité forte et unique de cette discipline en continuant à l'appliquer à des sujets variés.

Enfin j'espère dans l'année à venir être à la hauteur de vos attentes et rencontrer encore plus de gens alignés avec cette vision d'une science informatique par tous et pour tous.

Je félicite les membres d'honneur des années passées, et ceux de 2020, Gérard Berry, Monique Chabre-Peccoud et Claude Girault, dont la vision, les actions et les travaux, permettent de faire rayonner les sciences informatiques à travers le monde.

Merci à vous tous !

PRIX ET DISTINCTIONS



Bilan du prix de thèse Gilles Kahn 2019

Clémentine Maurice et Charlotte Truchet

Le prix de thèse Gilles Kahn 2019, décerné par la SIF et patronné par l'Académie des sciences, a été attribué à :

RAPHAËLLE CRUBILLÉ

pour sa thèse « Behavioral Distances for Probabilistic Higher-order Programs », soutenue à l'Université Sorbonne Paris Cité, et préparée à l'Institut de recherche en informatique fondamentale (IRIF) sous la direction de Thomas Ehrhard et Ugo Dal Lago.

Les accessits (par ordre alphabétique) ont été décernés à :

AHMED BOUBRIMA

pour sa thèse intitulée « Deployment and Scheduling of Wireless Sensor Networks for Air Pollution Monitoring », soutenue à l'Université de Lyon et opérée au sein de l'INSA de Lyon, sous la direction d'Hervé Rivano.

CAMILLE MARCHET

pour sa thèse « Des lectures aux transcrits : méthodes de novo pour l'analyse du séquençage des transcriptomes de deuxième et troisième génération », soutenue à l'Université de Rennes 1, et préparée à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (IRISA), sous la direction de Pierre Peterlongo.

Les thèses des lauréats sont accessibles sur le site de la SIF :

<http://www.societe-informatique-de-france.fr/recherche/prix-de-these-gilles-kahn/>



et les différents travaux de thèse sont racontés dans la rubrique « Il était une fois... ma thèse » du blog binaire à l'adresse :

<http://binaire.blog.lemonde.fr/category/une-fois-ma-these/>

Un résumé de chacune de ces thèses vous sera proposé dans le prochain numéro de 1024.

Le jury a reçu cette année 36 dossiers couvrant un très large spectre de travaux de recherche et en provenance de nombreux laboratoires de recherche en informatique. Quelques thématiques et laboratoires étaient cependant absents. Nous rappelons donc que ce prix s'adresse à l'ensemble de la discipline informatique et à l'ensemble des laboratoires ou centres de recherche français.

Le jury 2019 était présidé par Charlotte Truchet, assistée par Clémentine Maurice, secrétaire du prix. Le jury était constitué de Sihem Amer-Yahia, Aurélien Bellet, Julien Bourgeois, Raphaëlle Chaine, Thomas Chatain, Johanne Cohen, Caroline Collange, Hélène Fargier, Jérôme Feret, Omar Fawzi, Cédric Lauradoux, Olivier Ly, Claire Maiza, Clément Maria, Théo Mary, Vincent Nicomette, Laurent Perron, Carine Pivoteau, Pascal Poizat, Yann Ponty, Gerson Sunye, François Taiani, Fabien Tarissan, et Tristan Vaccon.

Merci à toutes les candidates et tous les candidats pour la qualité de leurs travaux et merci aux membres du jury pour leur participation.

PRIX ET DISTINCTIONS



Prix de thèse Gilles Kahn 2020

Clémentine Maurice et Charlotte Truchet

PRIX DE THÈSE GILLES KAHN 2020

patronné par l'Académie des sciences et décerné par la SIF

<http://www.societe-informatique-de-france.fr/recherche/prix-de-these-gilles-kahn/>

Date limite de candidature : **14 septembre 2020.**

Le prix de la Société informatique de France (SIF) a été créé en 1998 pour récompenser chaque année une excellente thèse en informatique. Gilles Kahn, qui a présidé les trois premiers jurys du prix, était convaincu de l'intérêt de promouvoir les jeunes talents les plus prometteurs de notre discipline. En son honneur, le prix a pris depuis 2007 le nom de Prix de thèse Gilles Kahn et est patronné par l'Académie des sciences qui rend ainsi hommage à un de ses membres éminents. La SIF souhaite par ce prix promouvoir toutes les facettes de l'informatique, des travaux fondamentaux aux travaux appliqués ayant donné lieu à transfert industriel, de ceux réalisés dans les grands centres à ceux réalisés dans des centres plus modestes. L'objectif de ce prix est de dynamiser et de motiver de jeunes chercheurs en les récompensant, et de faire connaître à l'ensemble de la communauté informatique d'excellents travaux de recherche. Un jury d'universitaires et de chercheurs, présidé par Charlotte Truchet, sélectionnera parmi les thèses soutenues au cours de l'année universitaire celle qui recevra ce prix. En outre, le jury pourra également distinguer, s'il le souhaite, au plus deux accessits.



La remise officielle du prix se fera début 2021 lors du congrès de la SIF. À cette occasion, le récipiendaire se verra remettre un chèque de 1500 euros et chacun des autres lauréats éventuels un chèque de 500 euros. Tous seront également invités à présenter leurs travaux à l'ensemble de la communauté scientifique. Sous réserve de remplir les conditions de candidature, les lauréats au prix de thèse Gilles Kahn seront considérés comme candidats à la nomination par Inria pour le prix Cor Baayen de l'ERCIM.

Les critères pris en compte par le jury pour sélectionner les lauréats sont notamment l'originalité des résultats, l'originalité du domaine et des méthodes utilisées, l'importance et l'impact des résultats obtenus, et bien évidemment la qualité de la rédaction puisqu'il s'agit de récompenser non seulement un travail mais surtout une thèse.

En 2019, sous la présidence de Charlotte Truchet et avec l'assistance de Clémentine Maurice, secrétaire du prix, le jury était constitué de Sihem Amer-Yahia, Aurélien Bellet, Julien Bourgeois, Raphaëlle Chaine, Thomas Chatain, Johanne Cohen, Caroline Collange, Hélène Fargier, Jérôme Feret, Omar Fawzi, Cédric Lauradoux, Olivier Ly, Claire Maiza, Clément Maria, Théo Mary, Vincent Nicomette, Laurent Perron, Carine Pivoteau, Pascal Poizat, Yann Ponty, Gerson Sunye, François Taiani, Fabien Tarissan, et Tristan Vaccon.

Comme il est d'usage, le jury est partiellement renouvelé chaque année, et totalement renouvelé tous les trois ans.

Calendrier

- 13 juillet 2020 : ouverture de l'interface web de soumission
- 14 septembre 2020 : date limite de dépôt des candidatures
- début décembre 2020 : notification des résultats aux candidats
- début 2021 : remise officielle du prix lors du congrès de la SIF

Interface web de candidature

<https://easychair.org/conferences/?conf=prixsif20>

Dossier de candidature

Peut candidater tout étudiant ou étudiante ayant soutenu son doctorat d'informatique dans une école ou université française entre le 1^{er} septembre 2019 et le 31 août 2020. Toute candidature devra être explicitement soutenue par le(s) directeur(s) ou directrice(s) de thèse, qui ne peuvent en aucun cas soutenir deux candidats ou candidates.

Tous les documents doivent être déposés par le biais de l'interface web. En cas de problèmes à utiliser l'interface, ou pour toute autre question concernant le prix, les

candidats et candidates sont invités à contacter par courrier électronique la secrétaire du prix, Clémentine Maurice (clementine.maurice@irisa.fr).

Chaque dossier doit notamment comprendre :

- la thèse (en PDF),
- les rapports de pré-soutenance des rapporteurs (scannés, en PDF),
- le rapport de soutenance (scanné, en PDF),
- une lettre appuyant la candidature au prix de thèse, directement envoyée par le(s) directeur(s) ou directrice(s) de thèse à Clémentine Maurice (clementine.maurice@irisa.fr),
- des lettres de soutien complémentaires que le candidat ou la candidate jugerait utile de fournir au jury, directement envoyés par les personnes concernées à Clémentine Maurice (clementine.maurice@irisa.fr).

Le formulaire en ligne demande également de saisir certaines informations : un résumé de la thèse, un CV, ainsi qu'une liste de publications.



La file de chapeaux

Jean-Paul Delahaye¹

La rubrique « Récréation informatique » propose une petite énigme algorithmique ou sur un thème de mathématiques discrètes susceptible d'intéresser un lecteur de 1024. La solution est donnée dans le numéro suivant.

Rappel et solution du problème précédent

LA CARTE D'EMBARQUEMENT PERDUE ?

Les cent passagers du vol Paris-Madrid se présentent en file à la porte de l'avion un à un. Il y a exactement cent places dans l'avion. Le premier ne trouve plus sa carte d'embarquement et va s'assoir à une place au hasard. Les autres ou bien trouvent leur place libre et l'occupent ou bien, si elle occupée, vont s'assoir à une place au hasard parmi les places libres. Quelle est la probabilité pour que le dernier passager à entrer dans l'avion puisse s'assoir à la place qu'indique sa carte d'embarquement ?

SOLUTION. Merci à Louis Rousselet, Eric Wegrzynowski, Elie Cattan et Marc Filippi qui m'ont fait parvenir la réponse à ce problème... pas si facile.

1. Professeur émérite, université de Lille, campus scientifique, CRISTAL UMR CNRS, 9189 Centre de recherche en informatique signal et automatique de Lille, bâtiment ESPRIT, 59655, Villeneuve d'Ascq Cedex France. E-mail : jean-paul.delahaye@univ-lille.fr.

Point 1. Quand le dernier voyageur cherche sa place, il n'y a que deux possibilités : soit la dernière place libre est la sienne, soit c'est celle du premier voyageur. En effet, considérons un voyageur dont la place est X et qui n'est ni le premier voyageur de la file d'entrée, ni le dernier. Quand le tour de ce voyageur arrive, soit la place X est libre et alors, il l'occupe, soit elle est occupée et il va ailleurs. Dans aucun cas la place X ne sera donc encore libre quand le dernier voyageur se présentera. Donc, quand le dernier voyageur se présente, toutes les places des voyageurs autres que le premier et le dernier sont occupées, et donc seules restent susceptible d'être libres la sienne et celle du premier voyageur.

Point 2. Quand la file avance, à chaque nouveau voyageur il peut se produire deux situations :

- Sa place est libre, il l'occupe ;
- Sa place est occupée et alors il va occuper une des k places libres au hasard (donc pour chacune avec une probabilité $\frac{1}{k}$). Si l'une des places du premier ou du dernier est occupée, il n'occupera pas l'autre (sinon on aurait une contradiction avec le point 1). Si aucune des places du premier ou du dernier n'est occupée, il pourra alors l'occuper mais chacune a la même probabilité d'être prise ($\frac{1}{k}$). Ceci est vrai à chaque étape, donc les places du premier et du dernier sont toujours dans une situation équivalente et donc elles ont au total la même probabilité d'être occupée quand le dernier passager cherche sa place, et cette probabilité est donc $\frac{1}{2}$, ce qui signifie aussi que le dernier passager a une chance sur deux de trouver sa place libre.

Une généralisation intéressante du problème est possible. Considérons l'avant-dernier passager. Quand il arrive à sa place, seules deux parmi les trois places du premier, du dernier et la sienne sont susceptibles d'être libres (même raisonnement qu'au point 1). En raisonnant comme pour le point 2, on trouve qu'il y a une parfaite symétrie entre ces trois places tant que l'avant-dernier passager n'est pas passé et donc l'avant-dernier passager a une chance sur trois de trouver sa place occupée.

De la même façon le passager se présentant le $(100 - p)$ -ième a une probabilité $\frac{1}{p+2}$ de trouver sa place occupée. Notons qu'on retrouve l'affirmation évidente que le passager se présentant en deuxième ((100 - 98)-ième) a une probabilité $\frac{1}{100}$ de trouver sa place occupée.

Nouveau problème

LA FILE DE CHAPEAUX

Un groupe de N étudiants est soumis à un test. L'arbitre leur explique qu'ils vont se mettre en rang les uns derrière les autres, tous tournés vers la gauche. L'arbitre posera sur leur tête un chapeau rouge ou bleu tiré au hasard avec équiprobabilité. L'étudiant le plus à droite pourra voir tous les chapeaux sauf le sien ; l'étudiant placé devant lui pourra voir tous les chapeaux sauf le sien et celui de l'étudiant placé derrière lui (le plus à droite).

Plus généralement, l'étudiant placé en position k à partir de la droite pourra voir tous les chapeaux des étudiants $k+1, k+2, \dots$ jusqu'au dernier le plus à gauche, mais ne verra aucun autre chapeau. L'étudiant N , au bout à gauche, ne voit donc aucun chapeau.

L'arbitre interrogera chaque étudiant sur la couleur du chapeau qu'il porte et leur distribuera ensuite autant d'ordinateurs portables qu'ils auront donné de bonnes réponses. Ils s'arrangeront entre eux pour se les répartir.

Avant de se mettre en rang, les étudiants discutent entre eux et conviennent d'un système de réponses. Une fois les étudiants alignés, les chapeaux sont placés au hasard et ils ne peuvent plus avoir d'échanges.

Dernière précision : l'arbitre interroge à voix haute et les étudiants répondent à voix haute sur ce que chacun croit être la couleur de son chapeau. L'arbitre commence par l'étudiant le plus à droite et termine par celui le plus à gauche.

Analysons un instant le problème soumis aux étudiants. En répondant au hasard, ils gagneront en moyenne $\frac{N}{2}$ ordinateurs car une réponse sur deux au hasard sera juste à peu près. Les étudiants peuvent obtenir bien mieux s'ils conviennent entre eux de la méthode de jeu suivante :

- L'étudiant 1 (le plus à droite) répondra en donnant la couleur du chapeau de l'étudiant 2, qui connaîtra donc de manière certaine la couleur de son chapeau (puisque l'il entend ce que dit l'étudiant 1).
- L'étudiant 2 répétera ce que l'étudiant 1 aura proposé et gagnera donc.
- L'étudiant 3 répondra en donnant la couleur du chapeau de l'étudiant 4 qui connaîtra de manière certaine la couleur de son chapeau.
- L'étudiant 4 répétera ce que l'étudiant 3 aura proposé et gagnera donc.
- Et ainsi de suite pour les autres étudiants.

Cette façon de procéder assure les étudiants d'avoir au moins $\frac{N}{2}$ réponses exactes si N est pair et $\frac{N-1}{2}$ si N est impair. En moyenne, le nombre de réponses justes sera environ $\frac{3N}{4}$, car les étudiants de rang impair tomberont juste une fois sur deux environ.

C'est très bien, se disent les étudiants qui s'apprêtent à adopter cette tactique de jeu. Pourtant, l'un d'eux, Alonso, intervient et dit : « *Non, j'ai une autre idée, nous pouvons être certains de gagner $N - 1$ ordinateurs au moins, et N ordinateurs une fois sur deux* ». Il semble impossible que les N étudiants puissent gagner de manière certaine $N - 1$ ordinateurs et peut-être N ! Pourtant Alonso est un bon étudiant qui ne se trompe jamais.

Quelle est l'idée d'Alonso ? Autre question : la méthode d'Alonso s'adapte-t-elle au cas où la couleur du chapeau est possible non plus parmi deux couleurs, mais parmi k couleurs avec $k > 2$? Et s'il y a une infinité de couleurs ?

Envoyez vos réponses à jean-paul.delahaye@univ-lille.fr. Le nom des premiers lecteurs à me donner la bonne réponse (et à la justifier) seront mentionnés dans le prochain numéro de 1024.

ADHÉRER À LA SIF

La Société informatique de France est un espace de réflexion, de concertation sur les enjeux de l'informatique, mais aussi un espace d'actions, basé sur le travail de la communauté, qui vise à rassembler toutes celles et tous ceux pour qui faire progresser l'informatique est un métier ou une passion : enseignants, chercheurs, ingénieurs, industriels, consultants et étudiants.

Les adhésions sont valables 12 mois à compter de la date d'adhésion.

Personnes physiques

Tarif plein : 30 €

Tarif réduit : 15 €

- Membre d'un adhérent institutionnel de la SIF.
- CDD, CDI depuis moins de 2 ans, retraité.
- Membre d'une association partenaire, ou de l'ACM.

Gratuit : étudiants, doctorants et post-doctorants.

La SIF vous offre la possibilité d'effectuer le règlement de la cotisation directement en ligne.

Partenaires (Personnes morales)

Les associations partenaires, membres du Conseil des associations de la SIF, ne paient pas de cotisation. Les institutions telles que laboratoires, unités d'enseignement, ou entreprises, peuvent adhérer en tant que telles à la SIF. Il n'existe pas de tarif spécifique pour les adhérents institutionnels : en fonction de leur taille, de leur secteur d'activité, l'importance de l'effort ne se mesure pas de la même façon.

La SIF propose cinq niveaux de cotisation. Pour vous aider dans votre choix, vous trouverez ci-dessous une indication du tarif en fonction de la taille de l'adhérent institutionnel :

- Tarif 1 : 250 € (moins de 50 personnes)
- Tarif 2 : 500 € (de 50 à 100 personnes)
- Tarif 3 : 1000 € (de 100 à 150 personnes)
- Tarif 4 : 1500 € (de 150 à 200 personnes)
- Tarif 5 : 2000 € (au delà de 200 personnes)

Pour adhérer, vous devez contacter notre trésorier. Pour toute question, ne pas hésiter à contacter notre secrétariat.

Plus d'informations sur notre site internet :

<https://www.societe-informatique-de-france.fr>



Institut Henri Poincaré,
11 rue Pierre et Marie Curie,
75231 Paris Cedex