

Quelques pistes pour l'étude des situations d'informatique débranchée

Eric Duchêne & Aline Parreau

Abstract. Computer science unplugged is a scientific popularization project initiated in the 1990s by a team of New Zealand researchers. It enables participants to discover the major concepts of computer science, without a computer, through physical activities or the use of physical material, and also to initiate them into the computer science research process. This device, which is currently widely considered by both mediators and teachers, requires an in-depth analysis as a tool for transmitting knowledge. This analysis is currently in its beginning. Through three examples of popularization situations in computer science unplugged, we propose lines of thought based on observations with the perspective of a more complete didactic analysis of these situations and their transposition into classrooms.

Keywords. Computer Science Unplugged, Algorithms, Pop science

Résumé. L'informatique débranchée est un dispositif de médiation scientifique introduit dans les années 1990 par une équipe de chercheurs néo-zélandais. Elle permet, sans ordinateur et via des mises en scène corporelles ou l'utilisation de matériel original, de faire découvrir aux participant-e-s les grands concepts de la science informatique, mais aussi de les initier à la démarche de recherche en informatique. Ce dispositif actuellement largement considéré à la fois par les médiateur-ric-e-s et les enseignant-e-s nécessite une analyse approfondie en tant qu'outil de transmission de savoir. Cette analyse n'en est actuellement qu'à ses balbutiements. À travers trois exemples d'activités d'informatique débranchée, nous proposons des pistes de réflexions issues d'observations sur le terrain en vue d'une analyse didactique des activités d'informatique débranchée plus complète et d'une transposition en classe.

Mots-Clés. Informatique Débranchée, Médiation Scientifique, Algorithmes

Table des matières

1. Introduction	2
2. Trois situations d'informatique débranchée	4
2.A. Le base-ball multicolore	4
2.A.a. Description de la situation	4
2.A.b. Stratégies de résolution possibles	4
2.A.c. Analyses des algorithmes proposés	5
2.A.d. Notions mises en jeu	6
2.A.e. Variantes	6
2.A.f. Public concerné	6
2.B. Le réseau de tri	7
2.B.a. Description de la situation	7
2.B.b. Analyse de la situation	7
2.B.c. Notions mises en jeu	8
2.B.d. Public concerné	9
2.C. La machine qui apprend à jouer toute seule	9
2.C.a. Description de l'activité	9
2.C.b. Analyse de la situation	10
2.C.c. Vers une IA autonome dans son apprentissage	11
2.C.d. Notions mises en jeu	12
2.C.e. Public concerné	12
3. Vers une étude didactique des situations d'informatique débranchée	12
3.A. Nature de la situation	13
3.B. Place de l'apprenant.e	13
3.C. Place de l'ordinateur	15

Nous remercions episciences.org pour l'hébergement en libre accès de l'*Épijournal de Didactique et Epistémologie des Mathématiques pour l'Enseignement Supérieur*.

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet ASMODEE - ANR 21 - SSMS - 0001.

4. Des situations d'informatique débranchée en classe	15
5. Conclusion	16
Références	17

1. Introduction

La révolution numérique a induit, pour l'ensemble de la société, des questionnements, des besoins de connaissances ou encore des inquiétudes sur ce qui régit nos systèmes et outils modernes. Pour répondre à ces attentes, la médiation scientifique en informatique permet de construire un échange entre la communauté scientifique et le reste de la société.

Parmi les diverses activités de médiation en informatique, notre hypothèse de travail est que celles dites d'*informatique débranchée* (terme désormais courant dans les programmes scolaires) constituent un levier particulièrement efficace pour faire comprendre au public ce qu'est l'informatique (Académie des Sciences, 2013 ; Bell & Lodi, 2019). Si ces activités de médiation en informatique débranchée ont émergé dans les années 1960 (notamment avec Seymour Papert et la fameuse tortue Logo), elles sont devenues très populaires depuis l'initiative CS Unplugged¹ portée par des chercheurs néo-zélandais à fin des années 1990 (Bell, Witten, & Fellows, 1998).

En s'appuyant sur du matériel tangible ou une mise en jeu corporelle, les activités d'informatique débranchée permettent au public de s'abstraire de l'ordinateur pour mieux comprendre l'essence et les concepts de la science informatique. Il s'agit par là d'expérimenter la science informatique en insistant sur les quatre grands piliers de cette science comme définis par (Dowek, 2011) : les données, les algorithmes, les langages et la machine. Pour traiter chacun de ces piliers, les supports d'activité sont variés : tapis grand format, objets en bois, cartes, légos, élastiques... En termes de notions abordées, ces activités cherchent à couvrir tous les champs de l'informatique, qu'il s'agisse de ceux qui figurent dans les programmes scolaires (algorithmes, réseaux, sécurité), ou de ceux qui font l'objet de recherches accrues de nos jours (intelligence artificielle, algorithmique distribuée, etc.).

Les activités d'informatique débranchée sont désormais utilisées par de nombreux chercheur.euse.s pour leurs activités de médiation, mais également par de nombreux enseignant.e.s en classe. En France, des groupes de travail ont émergé pour élaborer et analyser certaines activités existantes, et en construire de nouvelles. Ces groupes se sont constitués au sein des Instituts de Recherche sur l'Enseignement en Mathématiques (IREM), de la Société Informatique de France², ou encore de projets de recherche soutenus par le ministère. Du matériel à disposition des enseignant.e.s sous forme de fiches détaillées est également régulièrement proposé pour favoriser le déploiement de telles activités auprès des publics scolaires.

Puisque ces activités constituent un outil de transmission de connaissances, il semble pertinent de s'interroger sur la nature de cette transmission, notamment vers les scolaires. L'analyse de cette transmission du savoir peut se faire en suivant un schéma d'analyse didactique qui intégrera, en plus des éléments épistémologiques, la prise en compte des aspects organisationnels et ergonomiques qui peuvent constituer à la fois des leviers et des freins dans la transmission des connaissances (Da Ronch, 2022).

Dans la littérature, les études épistémologiques autour de l'informatique débranchée ne sont pas si fréquentes. Un travail d'identification et de structuration des savoirs élémentaires reste à développer pour de nombreuses situations. De manière générale, dans les travaux existants (par exemple (Collectif, 2017 ; Bell et al., 1998) et toutes les ressources associées), le niveau de description des notions en jeu reste assez général. L'analyse didactique détaillée de la situation elle-même, comme des savoirs de la discipline, nécessite une granularité plus fine. En effet, un schéma d'analyse didactique rigoureux se

1. <https://www.csunplugged.org/en/>

2. <https://www.societe-informatique-de-france.fr/mediation/infosansordi/>

veut d'objectiver au mieux tous les savoirs et savoir-faire qui peuvent entrer en jeu, notamment lorsque les valeurs des variables didactiques de la situation évoluent. Pour rappel, les variables didactiques sont les paramètres d'une situation ou d'un problème qui influencent les stratégies de résolution de l'élève ou du public lorsque modifiés par l'enseignant·e ou le médiateur·ice. Dans les travaux actuels sur l'informatique débranchée, les valeurs de ces variables ainsi que les stratégies de résolution sous-jacentes sont rarement explorées avec une grande exhaustivité. Actuellement, en France, seules quelques situations ont été éprouvées de la sorte, notamment suite aux travaux conjoints entre informaticiens, didacticiens et enseignants dans certains IREM ou au sein de la Fédération Recherche Maths à Modeler³ (voir par exemple (Esclafit, Modeste, & Saby, 2020; Meyer & Modeste, 2022; Modeste, 2012; Boissière, Pelay, & Rougetet, 2017)). On notera au passage que certaines situations étudiées dans le passé au sein de cette fédération peuvent s'inscrire dans le champ des activités débranchées, car relevant de certaines notions d'informatique théorique.

Des concepteurs du mouvement CS Unplugged viennent récemment de partager ce constat au niveau international (Bell & Vahrenhold, 2018). Leur étude illustre en quoi cette étude des savoirs est cruciale, en particulier pour les enseignant·e-s, à travers l'analyse approfondie de deux exemples de situation (coloration de graphes et réseaux de tri).

En ce qui concerne l'analyse didactique des situations d'informatique débranchée, et plus généralement de l'informatique, il s'agit d'un chantier d'envergure qui devrait nourrir les prochaines décennies étant donné la présence grandissante de l'informatique dans les programmes scolaires et la nécessité de structurer les pratiques. Pour cela, la didactique de l'informatique, comme discipline scientifique, née dans les années 1980 (Pea, 1987), trouve un regain d'intérêt récent et se structure encore. Au niveau national, les études récentes dans ce domaine portent principalement sur l'enseignement en classe. Celles-ci s'inscrivent dans la lignée du travail de Baron et Bruillard (Baron & Bruillard, 1997), qui illustre ce besoin de complémentarité entre chercheurs en Sciences Humaines et Sociales et informatique pour aborder le sujet. Récemment, le projet ANR JCJC DEMaIn⁴ s'est intéressé aux relations entre didactique des mathématiques et de l'informatique et aux enjeux des interactions mathématiques-informatique sur les plans épistémologique et didactique. Le projet ANR Asmodée cherche quant à lui à développer des outils conceptuels qui permettent d'analyser les situations d'informatique débranchée avec rigueur, en vue d'une utilisation adéquate par les médiateur·ice-s, chercheur·euse-s et enseignant·e-s.

L'objectif de cet article est de proposer des pistes de réflexions issues d'observations sur le terrain en vue d'une analyse didactique des situations d'informatique débranchée et d'une transposition en classe. Nous présentons tout d'abord en section 2 trois activités qui nous semblent représentatives de la diversité des pratiques possibles, avec une analyse succincte de chacune d'entre elles. Puis nous proposons en section 3 une réflexion sur différents critères qui peuvent caractériser une situation d'informatique débranchée. Nous nous interrogeons tout d'abord sur la nature et les objectifs généraux de ces situations, qui peuvent être multiples. Puis nous identifions deux spécificités liées à la discipline informatique et à l'organisation de ces activités, en questionnant leur influence sur la compréhension et l'apprentissage des notions mises en jeu. La première spécificité est la place de l'apprenant·e dans l'activité. Dans de nombreuses situations d'informatique débranchée, l'apprenant·e est un élément même du dispositif, d'autres fois il a un positionnement extérieur. La deuxième spécificité est la place de la machine : dans quels cas la réintroduction de l'ordinateur est-elle importante ? Enfin, dans la section 4, nous nous demanderons quels sont les points de vigilance à intégrer lors d'une mise en pratique de ces situations en classe.

3. <https://mathsamodeler.ujf-grenoble.fr/accueil.html>

4. <https://imag.umontpellier.fr/~modeste/demain.html>

2. Trois situations d’informatique débranchée

Nous présentons ici trois situations qui serviront de fils rouges pour illustrer notre compréhension des activités d’informatique débranchée. Ces situations ont été choisies pour leur diversité par rapport aux trois éléments de réflexion proposés dans cet article : nature de l’activité, place de l’apprenant·e et place de l’ordinateur. Pour chacune d’entre elle, nous donnons les éléments principaux nécessaires à sa compréhension ainsi que des liens vers des descriptifs plus détaillés.

2.A. Le base-ball multicolore

Cette situation est issue de l’ouvrage original CS Unplugged (Bell et al., 1998), et aussi connu sous le nom de *jeu de l’orange*. Il permet entre autres d’aborder les notions d’algorithme et de complexité, ainsi que la problématique de ressources partagées et d’accès concurrent à ces ressources. Cette situation peut par exemple être retrouvée sur le site web⁵ de l’IREM de Grenoble, avec un séquençement possible en classe.

2.A.a. Description de la situation

On considère une situation avec N participant·e·s. En pratique, la situation fonctionne bien pour N compris entre 4 et 8. Des cerceaux de couleurs différentes (un par participant·e) sont disposés de façon circulaire. Chaque participant·e se place dans un cerceau (sa base) et reçoit dans chaque main une balle de la même couleur que sa base. On retire une balle au hasard dans l’une des mains d’un·e des joueur·euse·s. La position ainsi obtenue correspond à la position finale voulue. La figure 1 illustre une telle position avec $N = 5$ et une balle violette retirée. Les bases y sont représentées par des grands disques colorés et les balles par les petits disques. Le disque blanc correspond au trou.

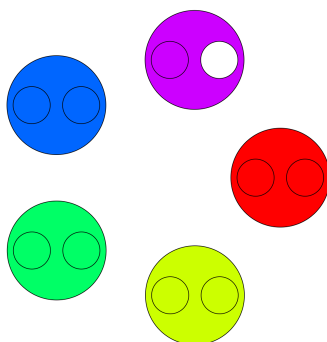


FIGURE 1 – Position finale du base-ball à cinq couleurs

On mélange ensuite toutes les balles des mains des joueur·euse·s pour obtenir une position de départ aléatoire. Le but du jeu est de retrouver la position finale (celle où chaque participant·e n’a que des balles de la couleur de sa base). La seule règle autorisée consiste à prendre une balle à l’un·e de ses voisin·e·s direct·e·s, lorsqu’on a une main de libre. Une configuration possible de départ suivie de deux premiers coups est représentée sur la figure 2.

Pour mieux comprendre la situation, une version jouable en ligne est disponible sur le site de Benjamin Wack⁶.

2.A.b. Stratégies de résolution possibles

Plusieurs stratégies de résolution peuvent émerger chez les participant·e·s. Parmi elles, on rencontre souvent les deux algorithmes suivants dans la plupart des expérimentations qui ont été faites sur ce

5. <https://irem.univ-grenoble-alpes.fr/recherche-action/themes/informatique-de-l-ecole-jusqu-au-lycee/activite-algorithmique-base-ball-multicolore-498730.kjsp>

6. www-verimag.imag.fr/~wack/baseball

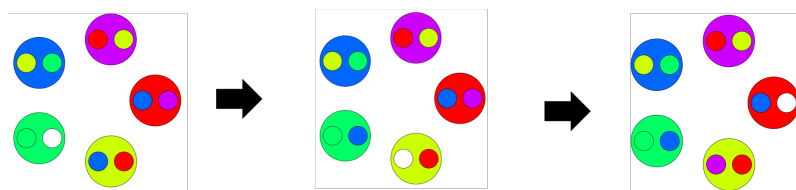


FIGURE 2 – Exemple de deux premiers coups au base-ball multicolore

problème.

Algorithme “tournant”. On ne décide de déplacer les balles que dans le sens des aiguilles d’une montre. Ainsi il y a à chaque fois seulement deux possibilités. On prend parmi les balles possibles celui qui est le plus loin de sa base. C’est celui qui est mis en place sur la page de Benjamin Wack.

Algorithme “en ligne”. On coupe en deux le cercle formé par les joueur·euse·s (par exemple au niveau de la base où il manque une couleur) pour obtenir une ligne, dont l’élément le plus à gauche est la base ayant une couleur en moins. Puis on remplit les bases de la droite vers la gauche avec la bonne couleur : on considère la dernière base en partant de la droite qui n’est pas correcte, et on cherche à ramener les balles de sa couleur vers cette base en déplaçant le trou à droite de la balle concernée, puis en déplaçant la balle d’un cran à droite jusqu’à ce qu’il retrouve sa base.

Un troisième algorithme peut être trouvé : **“Résolution avec une routine”**. On utilise une routine qui déplace une balle sur le trou sans toucher aux autres. On déplace ainsi une par une les balles à leur position finale. Cela simule le concept de fonction en programmation et de décomposition de programme.

2.A.c. Analyses des algorithmes proposés

Dans cette sous-partie, nous analysons les solutions proposées sous deux aspects correspondant aux enjeux principaux en algorithmique : à savoir leur correction (c’est-à-dire le fait que l’algorithme réponde bien au problème posé au bout d’un temps fini, quelque soit l’instance de départ), et leur complexité (c’est-à-dire sa qualité en termes de nombres d’opérations élémentaires effectuées). Une analyse plus poussée a été menée par l’IREM de Grenoble (Althuser, Brassat, Rasse, Vincent, & Wack, 2019).

L’algorithme “tournant” n’est en fait pas correct. S’il marche pour la plupart des cas rencontrés, il peut boucler infiniment pour d’autres. Pour s’en convaincre, on peut prendre la configuration finale à quatre bases et échanger deux couleurs consécutives. Alors on se convainc assez rapidement que l’algorithme boucle infiniment. Le problème vient du fait qu’on peut tout à fait déloger une balle bien placée si les deux balles qui peuvent se déplacer sont bien placées dans leur base et qu’il faut libérer l’une des deux.

On peut démontrer la correction de l’algorithme en ligne assez facilement avec l’argument suivant : on ne touche jamais aux bases qui sont bien remplies en partant de la droite. À chaque étape, on amène une balle de plus dans une base à droite à laquelle on ne touchera plus. Ainsi à la fin, tout est bien placé. En ce qui concerne la complexité de cet algorithme, on peut regarder le nombre de déplacements qu’il faut à l’étape i où l’on essaie de remplir la i -ème base en partant de la droite. Il y a au pire deux balles à déplacer, qui sont à une distance au plus $n - i$ de leur base. Il faut donc calculer le coût de déplacement d’une balle dans sa base située à distance inférieure ou égale à $n - i$. Pour cela, il faut tout d’abord déplacer le trou dans la base juste à droite de la balle. Le trou se situant à une distance au plus $n - i$ de la balle, il y a au plus $n - i$ étapes pour ramener le trou à droite. Ensuite on peut déplacer la balle à droite d’une case (une étape), puis il faut remettre le trou à sa droite (deux étapes). En trois étapes on a donc décalé le trou et la balle d’une case à droite. Ainsi en au plus $4(n - i)$ étapes, la balle a retrouvé sa base. On répète cela deux fois pour chaque i , et i allant de 1 à $n - 1$ ce qui donne un nombre d’opérations borné par $\sum_{i=1}^{n-1} 8(n - i)$. Au final, cet algorithme a une complexité de $O(n^2)$ dans le pire des cas. Cette borne est d’ailleurs atteinte lorsque toutes les couleurs sont inversées

(c'est-à-dire les couleurs les plus à droites sont à gauche).

La correction de l'algorithme avec la routine est assez facile à montrer vu qu'à chaque étape de la routine, une balle de plus est placée sur sa base et ne sera plus "retouchée ensuite" (à part au sein de la routine). On peut trouver une routine qui fonctionne en $O(d)$ étapes où d est la distance entre le trou et la balle. Comme $d \leq n/2$ et qu'on appelle au plus n fois la routine, cela amène aussi à un algorithme final de complexité $O(n^2)$.

Une question naturelle qui se pose alors est l'optimalité de ces deux derniers algorithmes en termes de complexité. Est-il possible de construire des algorithmes de complexité inférieure à ceux décrits précédemment ? Pour répondre à cette question, on peut calculer un nombre minimal de déplacements à faire de la manière suivante :

- à chaque étape, une seule balle est déplacée ;
- pour amener une balle à sa base, il faudra faire au moins d déplacements où d est la distance entre la balle et sa base ;
- il faut donc au minimum $\sum_{i \in P} d_i$ étapes où P est l'ensemble des balles et d_i la distance de la balle i à sa base.

En prenant la configuration où toutes les balles sont dans la base opposée, on a $d_i = n/2$ et on obtient donc au moins n^2 étapes. Ainsi la complexité du problème est en $O(n^2)$. Les deux algorithmes précédents étaient donc bien optimaux en complexité.

2.A.d. Notions mises en jeux

Pour le base-ball multicolore, l'analyse qui précède illustre que la question majeure qui sous-tend cette situation est celle de l'étude de la correction et de la complexité d'un algorithme. La question de la correction est assez naturelle pour les participant·e-s qui cherchent une solution qui doit marcher à tous les coups. Comment s'en convaincre ? Il est important de montrer aux participant·e-s que la validité d'un algorithme doit s'exprimer sur l'ensemble des instances possibles. La question de la complexité ne vient en général pas des participant·e-s mais est induite par la personne animant l'atelier. En ce qui concerne la complexité, elle est étroitement liée à la durée de calcul des machines pour faire tourner l'algorithme, et donc il s'agit d'un autre enjeu majeur dans la réalisation d'un algorithme.

Cette situation fait aussi apparaître les notions d'accès concurrents dans les programmes, illustrées lorsque plusieurs personnes veulent simultanément une même balle. Ceci est induit par la nature de la situation, où chaque participant.e joue le rôle d'une machine qui exécute une partie de l'algorithme, simulant ainsi les fondements d'un système distribué. La personne animant l'atelier peut demander aux participant·e-s comment résoudre ce problème. Une solution courante est d'exprimer des règles de priorité afin d'obtenir un comportement déterministe et non-bloquant de l'algorithme.

2.A.e. Variantes

Il existe plusieurs variantes de cette activité, qui consistent à changer le rôle du participant.e dans la situation. Dans la version originale, le participant contrôle sa base et c'est celui qui a une main libre qui peut choisir une balle parmi les quatre balles voisines. Dans une version centralisée, on peut supposer qu'une seule personne contrôle la situation et le déplacement des balles entre les joueur·euse·s. Enfin, dans la version *tous pour un*, les personnes jouent elles-mêmes le rôle des balles.

2.A.f. Public concerné

Cette situation a déjà été expérimentée pour des élèves allant du cycle 2 à l'Université. Les publics les plus jeunes se concentrent sur la conception et la formalisation d'algorithmes, ainsi que la démonstration de leur correction. Avec des lycéen·ne·s et des étudiant·e·s, on peut étendre l'analyse jusqu'à la complexité algorithmique, en comptant le nombre d'opérations dans le pire des cas avec un nombre de bases égal à 5 puis un nombre quelconque. Cette situation a été déployée autant dans un contexte de médiation qu'en classe, où les élèves peuvent être répartis en groupes de cinq.

2.B. Le réseau de tri

2.B.a. Description de la situation

La situation a lieu avec N participant-e-s, et on choisira très souvent en pratique $N = 6$ pour que le réseau ne soit ni trop simple si trop compliqué. On dessine au sol le réseau suivant (avec de la craie, ou des cerceaux et des lattes de sport).

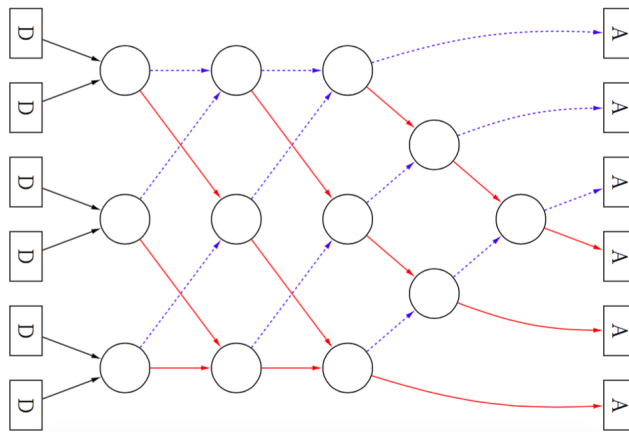


FIGURE 3 – Réseau de tri à six éléments

Sur chaque position D (départ) on place un élève. On distribue à chaque élève une petite fiche avec un nombre différent qu'ielles gardent face cachée. Chaque élève avance ensuite d'un cran en suivant la flèche dans la première rangée de cercles. Il y a donc après cette étape deux élèves par cercle. Puis les élèves appliquent la règle suivante jusqu'à être chacun-e dans une case A (arrivée) :

- tant que vous êtes tout-e seul-e dans un cercle, attendre que quelqu'un-e vous rejoigne ;
- une fois que vous êtes deux dans un cercle, comparez vos nombres. L'élève avec le plus petit nombre part à gauche dans le prochain cercle en suivant la flèche bleue, et l'autre suit la flèche rouge.

Une fois que tous les élèves sont dans les cases A, on leur demande de montrer le nombre. On constate qu'iels sont triés dans l'ordre croissant de gauche à droite !

2.B.b. Analyse de la situation

Cette activité est différente de la précédente, dans la mesure où l'on ne demande pas aux participant-e-s de trouver une solution à un problème. En revanche, c'est un ensemble de questions qui leurs sont suggérées ou qui émergent naturellement :

- Pourquoi cet algorithme a-t-il bien trié les nombres ?
- Cela marche-t-il à tous les coups quelle que soit la disposition des nombres au départ ? Comment en être sûr ?
- Cela peut-il marcher en prenant le réseau à l'envers ?
- Combien de "temps" faut-il pour être trié ? (que veut dire la notion de temps lorsque des opérations sont menées en parallèles ?)
- Comment fabriquer de tels réseaux de tris ? Quels sont les plus efficaces ?

Nous donnons ci-dessous plusieurs éléments de réponses à ces questions.

Correction de l'algorithme. Pour un réseau avec N participant-e-s, ce n'est pas facile de démontrer sa correction car il y a $N!$ entrées possibles à l'algorithme. Le principe dit de "zero-un" explique qu'il suffit de montrer que le réseau trie les 2^N séquences de longueur N formées uniquement de 0 et 1. Malgré cela, il reste co-NP-complet de démontrer qu'un réseau donné est correct (Parberry, 1991). Dans l'instance fournie avec $N = 6$, il est assez facile de se convaincre que les valeurs min et max seront

toujours placées au bon endroit à la fin. Pour les autres, l'étude de cas est un peu plus fastidieuse mais reste possible directement sur le réseau.

Dans le sens inverse. Le réseau ne fonctionne pas dans le sens inverse. Il suffit par exemple de prendre comme instance de départ les nombres 4, 1, 2, 3, 5, 6 dans cet ordre. Il s'agit toutefois d'une bonne illustration de la nécessité de vérifier la correction des algorithmes car les contre-exemples ne sont pas si nombreux que ça pour $N = 6$.

Par ailleurs, une autre question naturelle est de savoir ce qu'il se passe si on change le sens de départ depuis un cercle (flèche gauche ou droite). Là, il sera plus aisé de vérifier qu'un tri dans l'ordre décroissant aura lieu.

Complexité algorithmique. La nouveauté d'une telle situation vis-à-vis de la complexité algorithmique, c'est que le nombre d'opérations élémentaires total n'est plus le critère principal. En revanche, le nombre de couches du réseau (c'est-à-dire le nombre de fois où l'on peut effectuer des opérations élémentaires en parallèle) devient le critère de qualité le plus scruté. Dans l'exemple du réseau ci-dessus, on voit qu'il fonctionne en cinq étapes (c'est-à-dire cinq couches de comparaisons). Pour $N = 6$, il a été démontré qu'il n'était pas possible de faire un réseau de tri avec quatre couches seulement. D'ailleurs, on connaît la taille optimale des réseaux jusqu'à $N = 16$ (Bundala & Závodný, 2014) mais le problème reste ouvert au-delà.

Construction de réseaux. Il est possible de construire des réseaux optimaux pour des petites valeurs de N . Il s'agit d'ailleurs d'une activité de prolongement à faire sur table avec les élèves.

Pour $N = 4$, on a besoin d'au minimum cinq comparaisons et donc trois couches. C'est possible avec le réseau illustré dans la figure 4

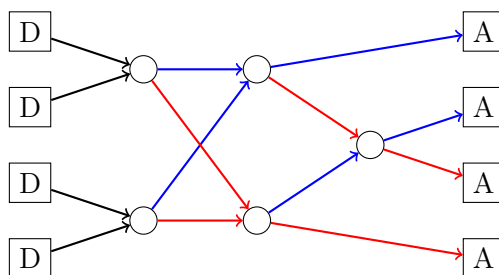


FIGURE 4 – Réseau de tri optimal à quatre éléments

Vérifier que les réseaux construits par les élèves fonctionnent et trient les quatre nombres quelle que soit leur disposition de départ fait partie des activités possibles qui illustrent le besoin d'une preuve de correction.

Il existe ensuite des stratégies pour construire des réseaux par récurrence. Par exemple on peut ajouter les éléments un par un en comparant l'élément supplémentaire avec tous les autres. Cela donne des réseaux avec $2N - 3$ couches pour N éléments en entrée (à chaque étape, on ajoute deux couches). On peut toutefois faire beaucoup mieux car il existe des réseaux de profondeur $\log^2 N$ comme le tri bitonique utilisé dans les processeurs graphiques (Batcher, 1968). Pour ce réseau, l'idée est de faire une dichotomie puis de fusionner les deux séquences triées.

2.B.c. Notions mises en jeu

La question du tri est l'objectif premier. Tout d'abord, il s'agira de discuter avec les élèves de la notion de tri, qui n'est pas identique de celle du langage courant (par exemple, trier ses déchets). En informatique, ce terme signifie ranger par ordre croissant et il sera intéressant d'aborder avec les élèves les raisons pour lesquelles cette activité est utilisée de façon centrale en informatique. Il est essentiel d'avoir des algorithmes très rapides, les tris portant souvent sur des données massives. Par exemple, quand on demande une recherche sur un moteur de recherche, les résultats (souvent par milliers ou par millions) apparaissent de façon triée. Le fait que plusieurs processeurs puissent

exécuter simultanément des parties d'un algorithme et sans conflit est une préoccupation majeure de l'informatique actuelle. Dans les enjeux liées à la parallélisation d'un algorithme, il reste à savoir quelles parties d'un algorithme peuvent être parallélisées et lesquelles ne peuvent pas l'être. On illustre bien souvent cet enjeu avec l'exemple d'un ensemble de personnes qui souhaitent creuser un trou. S'il s'agit d'un trou de 10m de long et de 50cm de profondeur, on pourra facilement paralléliser la tâche en donnant une pioche à chaque personne. S'il s'agit en revanche d'un trou de 10m de profondeur et de 50cm de large, la parallélisation ne semble pas adaptée.

2.B.d. Public concerné

Cette situation a déjà été expérimentée pour des élèves allant du cycle 2 au lycée, plutôt dans un contexte de médiation. La partie grandeur nature est très adaptée aux plus jeunes, avec quelques éléments de preuve de la validité de l'algorithme qui peuvent être donnés à partir du réseau au sol (comme la position du maximum à la fin de l'algorithme). À partir du cycle 4, la version centralisée est envisagée, avec la construction de nouveaux réseaux et des preuves de correction. Cette situation est certainement celle qui est la moins immédiate à transposer en classe, de par le format grandeur nature très encombrant dans l'espace. La version centralisée est par ailleurs difficile à appréhender pour les plus jeunes, en particulier sans avoir testé la version en grandeur nature.

2.C. La machine qui apprend à jouer toute seule

L'activité que nous allons décrire a été proposée par plusieurs membres du groupe Informatique Sans Ordinateur français. Elle permet d'illustrer la notion d'algorithme d'apprentissage par renforcement qui font partie d'une classe d'algorithmes très utilisés de nos jours en intelligence artificielle. On trouvera ci-dessous plusieurs ressources sur ce sujet, avec un paramétrage parfois différent de la situation :

- la page initiale avec la description de notre activité ⁷ ;
- un déroulé de l'activité telle que proposée à la Maison des Mathématiques et de l'Informatique ⁸ ;
- la situation dans une version plus détaillée et contextualisée ⁹ ;
- la version de Tangente Education par Florent Madelaine et Malika More (Collectif, 2017) ¹⁰.

Dans cette activité, le terme "machine" fait référence à un dispositif matériel non numérique, comme un ensemble de gobelets, de boîtes, de casiers, qui a pour objectif de simuler le comportement d'un algorithme. Dans cette situation, nous allons construire un dispositif (une machine donc) qui a pour objectif d'apprendre à bien jouer au jeu des bâtonnets (ou encore jeu de Nim). Dans sa version la plus générale, la position de départ de ce jeu est un entier positif N correspondant à la taille d'une pile de bâtonnets. Les règles du jeu sont fournies par un ensemble S d'entiers positifs. À tour de rôle, deux joueurs retirent un nombre x de bâtonnets de la pile, à condition que $x \in S$ et qu'il reste suffisamment de bâtonnets dans la pile. Le premier joueur qui ne peut plus jouer a perdu.

Lorsque $S = \{1, 2\}$, ce jeu correspond au jeu de Fort Boyard, où les deux joueurs retirent 1 ou 2 bâtonnets à tour de rôle et celui qui prend le dernier a gagné.

2.C.a. Description de l'activité

On construit une machine qui va apprendre à bien jouer toute seule au jeu des bâtonnets. L'exemple qu'on donne ci-dessous illustre le cas $N = 8$ et $S = \{1, 2\}$ mais on peut construire une machine pour n'importe quelles autres valeurs de S et N .

Dans sa version grand public, la machine est un objet en bois avec des casiers et des boules de couleurs à l'intérieur, telle qu'illustrée sur la page de notre activité ¹¹. Si cette machine assez imposante

7. <https://projet.liris.cnrs.fr/lirised/index.php?id=la-machine-qui-apprend-a-jouer-toute-seule>

8. https://mmi-lyon.fr/wp-content/uploads/Deroule_atelier_la_machine_qui_apprend_a_jouer_au_nim.pdf

9. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/IA-Nim-1.xml>

10. <https://www.tangente-education.com/article.php?art=4076&dos=158>

11. https://mmi-lyon.fr/wp-content/uploads/Deroule_atelier_la_machine_qui_apprend_a_jouer_au_nim.pdf

est souvent utilisée pour faire la démonstration de l'activité, nous allons ici en décrire une version mobile qui permet d'être multipliée facilement pour les scolaires. Cette machine est constituée des gobelets numérotés de 1 à N contenant des billes de couleurs, avec $|S|$ couleurs différentes. Chaque gobelet correspond à une position du jeu des bâtonnets. Dans notre exemple, comme $N = 8$, il y a 8 positions de jeu possibles : le gobelet 8 correspond à la position de départ avec 8 bâtonnets, le gobelet 7 à la position de jeu avec 7 bâtonnets, ...

Comme $|S| = 2$, chaque gobelet contient des billes de deux couleurs, disons jaune et rouge. Initialement, on initialise la machine avec autant de billes de chaque couleur (deux sur l'exemple ci-dessous), sauf lorsque l'un des coups ne peut être joué (gobelet 1 dans notre cas).

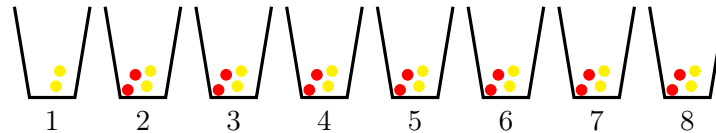


FIGURE 5 – Initialisation de la machine à huit gobelets

La machine va apprendre à jouer en affrontant un joueur humain. Il faut une personne qui joue pour la machine, et une autre qui joue le rôle de l'humain. On considère que la machine joue en premier, car dans la position de départ avec 8 bâtonnets, on sait qu'il existe une stratégie gagnante pour celui qui commence. Quand c'est à son tour de jouer, la personne qui simule la machine regarde dans quelle position de jeu elle se trouve (en comptant le nombre de bâtonnets restant), sélectionne le gobelet correspondant, et tire au sort une bille dans le gobelet (sans en regarder le contenu). Selon la couleur de la bille, elle retire 1 (si c'est jaune) ou 2 (si c'est rouge) bâtonnets. Chaque bille tirée au sort par la machine est posée devant le gobelet d'où elle vient. Le joueur humain joue ensuite son coup, puis la machine recommence et ainsi de suite jusqu'à la fin de partie.

Quand tous les bâtonnets ont été retirés, on regarde qui a gagné :

- si c'est la machine : pour chaque bille tirée au sort par la machine, on la remet dans son gobelet et on rajoute une autre bille de la même couleur. Ainsi, à la partie suivante, ce coup aura une probabilité plus forte d'être joué. On dit qu'on le "renforce" ;
- si c'est l'humain : chaque bille jouée est écartée, de sorte à diminuer la probabilité de rejouer ces coups à la prochaine partie. Ils sont donc pénalisés.

On enchaîne ensuite des parties. Lorsqu'un gobelet se vide, on le recharge comme au début, avec deux billes de chaque couleur. Au bout d'un certain nombre de parties jouées, on peut constater l'état des gobelets et voir si une stratégie gagnante apparaît.

2.C.b. Analyse de la situation

Étant donné que la machine joue au hasard au début, elle va perdre souvent. Plus le nombre de parties est grand, meilleur sera l'apprentissage de la machine. Le fait de renforcer ou de punir la machine après chaque simulation aléatoire est le principe de base des algorithmes d'apprentissage par renforcement.

Pour ce jeu avec $S = \{1, 2\}$, on sait que les positions perdantes sont les multiples de 3, et que depuis une position gagnante (non multiple de 3 donc), le coup gagnant consiste à se ramener à une position multiple de 3. Ainsi, la stratégie gagnante vers laquelle la machine devrait converger ressemble à celle de la figure 6.

Les positions perdantes (ici 3 et 6) correspondent à des gobelets qui ont tendance à se vider, car si la machine joue depuis ces positions, elle va perdre face à un humain expert. En pratique, il suffit d'un nombre relativement faible de parties jouées (entre 10 et 20) pour que l'état de la machine ressemble à celui de la figure 6.

Pour les élèves déjà familiers avec le jeu $S = \{1, 2\}$, on peut faire varier l'ensemble de coups

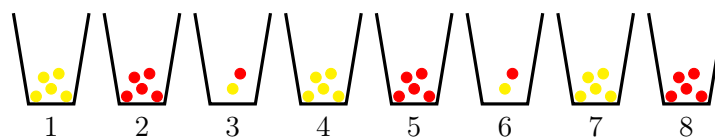


FIGURE 6 – Exemple d'état de la machine après plusieurs parties

autorisés en prenant par exemple $S = \{1, 3, 4\}$, et trois couleurs de billes. Dans ce cas, la stratégie gagnante est beaucoup moins triviale et l'enjeu de découverte de stratégie prend davantage de sens.

Comme pour la plupart des algorithmes d'apprentissage, le paramétrage peut avoir beaucoup d'influence sur la convergence de l'algorithme vers une stratégie gagnante. Dans cette activité, on peut illustrer cette problématique via plusieurs facteurs qui rendent l'apprentissage de la machine plus ou moins rapide :

- Le niveau de l'humain qui joue. Lorsque l'humain connaît la stratégie gagnante, on peut observer que la convergence de la machine vers la stratégie gagnante est plus rapide. En revanche, lorsque la machine affronte un joueur non expert, on peut alors facilement constater des erreurs d'apprentissage qui ralentissent la convergence.
- Le nombre de billes dans les gobelets au départ. Un trop grand nombre peut réduire la vitesse de convergence, mais un nombre trop faible peut conduire à une réinitialisation trop fréquente des gobelets et donc une situation relativement figée.
- Le nombre de billes que l'on rajoute/enlève quand la machine gagne/perd. Ce nombre est souvent crucial pour les applications basées sur l'apprentissage par renforcement. On peut notamment envisager des renforcements non constants, c'est-à-dire qu'ils dépendent de la position de jeu. Par exemple, une position proche de la fin est souvent plus proche de la stratégie gagnante qu'une position de départ. On aurait donc tendance à rajouter/enlever plus de billes pour ces positions lors de la phase de renforcement/pénalisation.

2.C.c. Vers une IA autonome dans son apprentissage

Quand on confronte cette situation à la pratique du chercheur en informatique, l'écueil principal est le fait de devoir entraîner la machine face à un humain. Les IA les plus performantes s'affranchissent bien entendu de cette contrainte en utilisant des programmes qui jouent contre eux-mêmes. En pratique, l'activité décrite ci-dessus est souvent complétée par les deux mises en situation suivantes :

(1) Jeu contre une autre machine. Avec une classe, on peut répartir les élèves en groupes où chacun.e entraîne sa propre machine dans un premier temps. Puis vient une phase de confrontation entre les machines entre deux groupes. Ainsi, les coups sont joués alternativement par chaque machine et on poursuit l'apprentissage avec les mêmes règles que précédemment. La machine qui gagne voit ses coups joués renforcés, et celle qui perd a ses coups joués pénalisés. Pour que cela soit équitable, on alterne les machines qui commencent la partie. Pour ne pas trop frustrer les participant-e-s, on veillera à rappeler qu'un renforcement négatif (après une défaite) est tout aussi utile à une machine qu'un renforcement positif (victoire).

(2) Jeu contre elle-même. De la même façon, on peut faire jouer une machine contre elle-même. On fait comme s'il y avait deux machines qui jouent avec le même ensemble de gobelets, et on sépare les billes jouées par la machine 1 (qui joue les coups pairs) et la machine 2 (qui joue les coups impairs). À la fin, on regarde la machine qui a gagné, on renforce (resp. on pénalise) les gobelets correspondant aux coups de la machine gagnante (resp. perdante). Ainsi, il y a en moyenne deux fois plus de gobelets qui sont renforcés/pénalisés que lorsque la machine joue contre un humain. La convergence est souvent plus rapide et l'apprentissage ne nécessite pas l'intervention d'un joueur humain.

2.C.d. Notions mises en jeu

Cette activité traite des algorithmes d'apprentissage par renforcement qui sont à l'origine des avancées récentes de l'intelligence artificielle et de leur percée dans notre quotidien : applications de reconnaissance d'image et de texte, robots conversationnels, voitures autonomes, robots... De manière générale, ils sont très utilisés pour résoudre des problèmes où l'humain n'a pas de bonne stratégie a priori. En l'occurrence, les jeux abstraits à deux joueurs à forte combinatoire sont un excellent terrain d'application pour ce type d'algorithme. On fera remarquer au passage que la façon de jouer de la machine et les phases de renforcement/pénalisation sont très faciles à coder sur un ordinateur.

C'est d'ailleurs sur ce socle que s'appuie le programme *Alpha Go* qui a battu le champion du monde humain du jeu de Go. Ce programme s'est montré le plus efficace lorsqu'il n'a été nourri par aucune connaissance autre que les règles du jeu (programme *Alpha Go zero*), comme c'est le cas dans notre situation avec le jeu des bâtonnets. Ce programme a appris à bien jouer en s'entraînant contre lui-même. Bien entendu, dans l'exemple précis d'Alpha Go et pour la plupart des applications mentionnées plus haut, l'apprentissage par renforcement est couplé à d'autres techniques d'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones, ce qui explique les performances exceptionnelles de ce type de programmes. Ils ont depuis été adaptés à d'autres jeux comme les échecs, en battant largement le meilleur programme connu jusque-là.

2.C.e. Public concerné

Cette situation peut tout à fait être déployée autant en classe que dans un contexte de médiation, dans la mesure où le matériel nécessaire n'est pas très imposant. En pratique, elle est utilisée à partir du cycle 4 (5ème, 4ème, 3ème) et n'est pas recommandée pour des élèves plus jeunes car les erreurs de manipulation sont souvent trop fréquentes et leur intérêt pour l'intelligence artificielle n'est pas suffisamment avéré. En terme de paramétrage, jusqu'à la seconde, le jeu avec $S = \{1, 2\}$ est préférable pour éviter les erreurs de manipulation, d'autant plus que les élèves ne connaissent pour la plupart pas la stratégie gagnante. À partir du lycée, la stratégie mathématique de cette instance étant souvent connue et vite repérée, les élèves ont tendance à mettre à jour les gobelets de façon quasi-automatique car iels savent vers quelle répartition iels doivent tendre. C'est alors que le jeu avec $S = \{1, 3, 4\}$ devient pertinent, afin qu'iels déploient l'algorithme sans idée a priori du résultat.

3. Vers une étude didactique des situations d'informatique débranchée

Nous pensons qu'il est pertinent de développer des outils conceptuels qui permettent d'analyser les situations d'informatique débranchée avec rigueur, en vue d'une réappropriation adéquate par les médiateur·ice·s, chercheur·euse·s et enseignant·e·s. Dans cet objectif, certains outils conceptuels issus des théories de la didactique peuvent s'appliquer pour un bon nombre de situations d'informatique débranchée, comme cela a été le cas pour la machine qui joue au jeu de Nim ([Esclafit et al., 2020](#)), où un schéma d'ingénierie didactique faisant appel à la Théorie des Situations Didactiques ([Brousseau, 2011](#)) a été utilisé. Dans cet article, des analyses *a priori* et *a posteriori* de la situation ont été confrontées après une phase d'expérimentation avec des élèves. Les variables didactiques identifiées ont été la forme de l'ensemble S (valeurs consécutives ou pas), le nombre de billes de chaque couleur au départ, ou encore l'organisation en groupes des élèves. Si l'analyse a été probante du point de vue de ces variables, cette activité ainsi que les deux autres présentées en Section 2 possèdent des spécificités supplémentaires propres à la discipline informatique. Comme suggéré en conclusion de ([Esclafit et al., 2020](#)), certaines de ces spécificités peuvent aussi jouer le rôle de variable didactique et méritent d'être analysées de façon plus approfondie. Tout d'abord, la nature même des activités présentées est diverse. Elles peuvent renforcer certaines notions en informatique connues des programmes scolaires (algorithmique notamment), ou alors faire découvrir aux participant·e·s des problématiques et techniques de

la recherche actuelle qui font souvent partie de leur quotidien (intelligence artificielle, algorithmique distribuée dans les exemples précédents). Au niveau du format, il est fréquent que les activités d'informatique débranchée correspondent à des situations où les participant·e·s sont intégré·e·s au dispositif de médiation (comme c'est le cas pour le réseau de tri). Ce format très immersif est souvent loué dans le processus d'appropriation de la situation par les élèves. Enfin, la question de la réintroduction de l'ordinateur se pose régulièrement, que cela soit pour replacer l'activité dans son contexte informatique (qui peut être oublié par le côté immersif de la situation) ou bien pour un passage à l'échelle lorsqu'une activité devient trop laborieuse à faire à la main.

Ces trois spécificités nécessitent à nos yeux une étude didactique ciblée, afin de comprendre en quoi elles peuvent influencer sur l'apprentissage et la compréhension des notions mises en jeu.

3.A. Nature de la situation

Nous constatons une première dichotomie qui relève de la nature même des situations. Certaines situations d'informatique débranchée ont pour objectif principal de faire découvrir une notion informatique. Bien souvent, il s'agit de notions plutôt complexes mais qui ont un lien avec la recherche actuelle, ou que les participant·e·s peuvent rencontrer dans leur quotidien de manière plus ou moins consciente. Cet enjeu d'éducation aux nouvelles technologies est d'ailleurs propre à ces activités de médiation. Les citoyens sont de manière générale très demandeurs d'explications à propos du fonctionnement d'outils qui sont omniprésents dans leurs vies. Les situations du réseau de tri et de la machine qui apprend à jouer toute seule ont clairement pour objectif de faire découvrir les notions de tri, d'algorithmique parallèle et d'apprentissage. Pour ces situations, on demande assez peu aux participant·e·s de raisonner, mais plutôt de constater des états après application d'un ensemble de règles, pour ensuite engager une discussion avec les médiateur·rice·s sur les problématiques inhérentes à la situation.

Pour d'autres activités comme le base-ball multicolore, l'objectif premier est la résolution d'un problème donné. En cela, ces situations se rapprochent davantage des problèmes ouverts et la position de l'apprenant·e de celle du chercheur en informatique. Cependant, la plupart des activités d'informatique débranchée qui proposent ces activités de recherche concernent des domaines de l'informatique théorique (algorithmique, combinatoire, théorie des graphes). En ce qui concerne les autres domaines de l'informatique, les mises en situation de recherche sont beaucoup moins nombreuses, ce qui nous conduit à nous interroger sur la nature même de la recherche en informatique. Ce type d'étude a déjà été réalisé dans d'autres disciplines comme la physique ou les mathématiques (El Hage & Ouvrier-Buffet, 2018 ; Da Ronch, 2022). Sur la situation de la machine qui joue au jeu de Nim, on peut ainsi se demander comment créer une situation qui reflète l'activité du chercheur en intelligence artificielle. Cela devrait se traduire par un travail sur le paramétrage des algorithmes d'apprentissage, mais la mise en place de telles situations s'avère complexe.

3.B. Place de l'apprenant·e

Dans certaines situations d'informatique débranchée, les participant·e·s peuvent avoir des positions différentes qui ont une influence sur la façon dont elles s'approprient, comprennent ou cherchent une résolution au problème posé. Plus concrètement, on peut constater deux types de positionnement : le positionnement dit *grandeur nature* et celui dit *centralisé*. Dans les activités grandeur nature, les participant·e·s sont considéré·e·s comme des objets de la situation. Le réseau de tri en fait partie, puisque les participant·e·s jouent eux-mêmes le rôle des données et des opérateurs qui effectuent les comparaisons. Dans le base-ball multicolore, iels jouent le rôle des bases (et aussi celui des balles dans la version grandeur nature un pour tous). Dans la version centralisée, les participants exécutent la situation en ayant une vue globale de celle-ci. Bien souvent, la version centralisée d'une situation revient à son étude sur une table, avec pour matériel du papier, des jetons à la place des participant·e·s etc.

Lorsque le temps est suffisant, de nombreuses situations sont organisées pour proposer une version grandeur nature lors du lancement de l'activité, ce qui semble favoriser l'appropriation et la compréhension du problème, suivie d'une version centralisée, qui tend à davantage placer les élèves dans une démarche de résolution. D'un point de vue informatique, il y a une différence fondamentale entre ces deux approches. La version grandeur nature propose de mettre en lumière les opérations élémentaires et l'aspect local (voire distribué) d'une démarche de résolution. La version centralisée permet de travailler sur l'aspect global et séquentiel qui est le plus souvent rencontré dans l'enseignement de l'informatique.

Sur les situations du base-ball et du réseau de tri, on peut constater cette différence de stratégie et d'objet d'étude principal des participant·e·s en fonction de ce format.

Pour le réseau de tri, la situation initiale est présentée dans sa version grandeur nature, ce qui fait tout d'abord s'interroger sur les opérations élémentaires lors de la constitution d'un algorithme de tri, à savoir les comparaisons deux à deux. L'autre enjeu qui est mis en avant est celui de la complexité algorithmique et donc de sa rapidité d'exécution. Pour illustrer ce point de vue, il est fréquent d'orienter l'activité sur la vitesse d'exécution des participant·e·s dans le réseau. Lorsque cette variable didactique du grandeur nature est activée, les élèves cherchent en effet à exécuter l'algorithme le plus rapidement possible, ce qui se fait parfois au détriment d'une exécution sans erreur. Ceci permet de renforcer la bonne compréhension des opérations élémentaires mises en jeu dans la situation. En revanche, dans cette version, les élèves se posent moins naturellement la question de la validité de l'algorithme, en se contentant d'accepter les instances données en entrée par l'enseignant·e. Ce ou cette dernière peut les amener à cette réflexion en leur demandant s'elles pensent que le réseau fonctionne également en le prenant en sens inverse.

Dans un second temps, le réseau de tri peut être proposé aux élèves sur table, notamment pour la construction de réseau optimaux pour $N = 4$. Dans cette version centralisée où chacun·e voit le réseau en intégralité, l'accent est mis sur la conception et la correction des réseaux proposés. En terme de conception, il est clair qu'il est plus facile de construire et d'imaginer de tels réseaux sur une feuille qu'avec des cerceaux au sol. En terme de correction, le choix d'une faible valeur de N permet d'énumérer plus facilement l'ensemble de toutes les entrées possibles. Lorsque le cas $N = 4$ est traité, on peut passer à des valeurs supérieures de N qui demandent aux élèves d'envisager des preuves de correction plus concises, puisque lister les $5!$ ou $6!$ ordres possibles en entrée - même en réduisant le nombre de cas par symétrie - reste fastidieux.

En ce qui concerne le base-ball multicolore, la version standard est grandeur nature où chaque participant·e joue le rôle d'une base. Là encore, cette version induit des stratégies locales et s'apparente à un algorithme distribué où chaque processeur exécute un algorithme en fonction de son voisinage. Ceci impose un processus collaboratif de décision afin d'éviter les blocages (que faire si deux personnes veulent la même balle?). Cette nécessité de trancher les situations d'accès concurrent est en revanche beaucoup moins immédiate dans la version centralisée où les participant·e·s peuvent construire et tester leur algorithme sur papier. Dans cette version, c'est l'aspect séquentiel qui est mis en valeur et la correction des algorithmes proposés est beaucoup plus facile à appréhender en testant plus facilement différentes configurations de départ.

Les analyses décrites ci-dessus sont le fruit d'expérimentations multiples menées dans différentes classes et par différent·e·s chercheur·euse·s, mais il n'existe à l'heure actuelle pas d'étude didactique réelle qui permettrait de valider les effets de cette variable didactique que constitue la place de l'apprenant·e dans la situation. Nous pensons qu'il y a ici un vrai enjeu didactique dans l'analyse de certaines situations, puisque ces situations grandeur nature font partie des spécificités les plus caractéristiques des activités d'informatique débranchée.

Au-delà des démarches de résolution, un intérêt supplémentaire des situations en grandeur nature est leur côté immersif qui permet aux participant·e·s d'accorder un intérêt souvent immédiat à ce qu'on leur propose.

De manière générale, de nombreuses activités sont désormais construites autour de ces deux as-

pects : grandeur nature pour immerger les participants dans la situation, puis passage sur table pour prendre de la hauteur sur la situation. À la Maison des Mathématiques et de l'Informatique à Lyon, une situation sur les réseaux de neurones¹² vient d'être construite sur ce format. A Terra Numerica, il s'agit d'une situation sur la coloration de graphes¹³.

3.C. Place de l'ordinateur

Dans les situations d'informatique débranchée, l'objectif est de s'abstraire de l'ordinateur pour mieux comprendre les notions abordées. Additionnée au côté souvent immersif de ces situations, cette abstraction peut parfois faire perdre le contexte dans lequel la notion s'intègre. Il existe alors un enjeu de *rebranchage* de la situation afin de montrer ou rappeler aux participant-e-s dans quelle cadre les notions qui viennent d'être vues interviennent. Concrètement, cela peut consister à implémenter certains des algorithmes présentés, ou tout simplement expliquer oralement dans quel champ de l'informatique elles interviennent.

Pour certaines activités, il semble pertinent de s'interroger sur la nécessité de cette phase de rebranchage, et sur la nature de celui-ci. Il en va de ce que les participant-e.s retiendront de la situation de médiation qu'ils viennent de vivre.

Si l'on prend l'exemple de la machine qui joue au jeu de Nim, une phase de rebranchage qui permet de montrer une implémentation de l'algorithme semble nécessaire car elle permet de passer à l'échelle en termes de nombre de simulations. On peut utiliser pour cela l'application disponible en ligne¹⁴. En particulier, lorsque les valeurs de l'ensemble de soustraction S ne sont pas consécutives, il est plus difficile de conjecturer le comportement périodique global des positions gagnantes du jeu avec des simulations sur un nombre de gobelets qui reste nécessairement limité. C'est notamment vrai lorsque l'on fait jouer les élèves au jeu $S = \{1, 3, 4\}$, où les positions gagnantes sont périodiques de période 7. Dans ce paramétrage, la situation débranchée permet de résoudre le problème pour des positions de départ avec 10 bâtonnets maximum, et le rebranchage permet aux élèves de faire une conjecture générale sur un nombre de bâtonnets quelconque. Enfin, cette application permet de changer le paramétrage de la machine, ce qui permet d'illustrer l'activité de recherche en informatique.

Pour la situation du base-ball, il existe également une application pour y jouer en ligne¹⁵. Cela dit, cela ne peut pas être considéré comme un vrai rebranchage, dans la mesure où il s'agit simplement de faciliter l'expérimentation de la version centralisée du jeu. La question pourrait en revanche se poser de faire programmer les algorithmes des participant-e-s (dans un langage simple) et de les tester. Il s'agirait là d'une vraie situation de rebranchage et on peut s'interroger sur son intérêt.

4. Des situations d'informatique débranchée en classe

Nous donnons ici des éléments de réponse à deux questions qui se posent lors d'une transposition en classe de telles activités : pourquoi et comment le faire ?

Pourquoi faire de l'informatique débranchée en classe ? L'informatique débranchée a largement fait ses preuves dans des contextes de médiation scientifique comme à la Maison des Mathématiques et de l'Informatique à Lyon, ou encore Terra Numerica à Sophia Antipolis. Les retours des participant-e-s et des enseignant-e-s dans ces lieux visités au quotidien par des élèves témoignent de la pertinence du format. Elles sont également désormais présentes dans les classes et dans certaines parties des programmes.

Cela dit, dans le cadre de l'apprentissage de l'informatique dans le secondaire, nous voyons quatre raisons principales pour lesquelles cet outil mérite une attention toute particulière :

12. https://mmi-lyon.fr/?site_ressource_peda=connecte-tes-neurones

13. <https://portail.terra-numerica.org/res/rsrc?all=1>

14. <https://projet.liris.cnrs.fr/~mam/machine/>

15. <https://projet.liris.cnrs.fr/~mam/valise/>

- Pour rendre les élèves actifs : enseigner la programmation peut être difficile en raison de manque de salles ou de matériel adéquat, ce qui peut conduire à des situations où des élèves partagent un ordinateur et où certain.e.s ne touchent pas au clavier pendant une séance entière.
- Pour réfléchir avant de coder : un problème courant chez les élèves apprenant l'informatique est leur envie immédiate de programmer sans prendre le temps de réfléchir. Cela peut entraîner des résultats incorrects ou illisibles. En supprimant (temporairement) les ordinateurs, les élèves apprennent à structurer leurs idées, à trouver une approche adéquate et à raisonner ([Sentance & Csizmadia, 2017](#)).
- Pour prendre du plaisir : l'informatique débranchée peut être pratiquée avec des objets comme du papier, des ciseaux et de la colle, et peut prendre la forme de défis, devinettes ou jeux en groupe. L'approche ludique peut captiver les élèves et atténuer l'aspect rébarbatif de certains enseignements traditionnels.
- Pour démystifier le numérique : le domaine souvent mal nommé du "numérique" est si vaste et flou qu'on pourrait presque y inclure tout ce qui implique la contemplation d'un écran. L'informatique ne doit pas être considérée comme une question de consommation de produits numériques ou d'utilisation d'applications magiques. Un des enjeux de l'informatique débranchée est de montrer que l'informatique est une science à part entière.

Comment faire de l'informatique débranchée en classe ? De manière générale, il semble important de détecter quelles situations peuvent être utilisées pour un enseignement en classe. Un premier travail dans ce sens a été réalisé par Drot-Delange ([Drot-Delange, 2013](#)). Au vu des programmes, il va souvent s'agir de situations qui ont trait à l'algorithmique ou au langage binaire. Si la version grandeur nature peut parfois être difficile à adapter en classe, elle semble apporter une plus-value indéniable dans l'acceptation de la situation par les élèves. Dans un second temps, la version centralisée des activités est souvent celle qui permet aux élèves de raisonner sur la situation et de proposer des résultats. Au même titre que pour les situations de recherche en classe ([Grenier & Payan, 2003](#)), cela demande aux enseignants.e.s de changer leur posture dans ce type de situations où les procédures des élèves sont moins cadrées qu'à l'habituel, et où les pistes de recherche peuvent être variables et sans réponse connue a priori.

Certains IREM comme celui de Grenoble¹⁶ proposent des situations avec des fiches détaillées à destination des enseignant.e.s et des élèves. Dans certains cas, on trouvera un séquençement précis qui permet de donner tous les outils aux enseignant.e.s pour une utilisation en autonomie. Sur le base-ball multicolore, on peut également mentionner un retour d'enseignant fait à Nancy avec des analyses de production d'élèves¹⁷.

5. Conclusion

À travers l'exemple de trois situations d'informatique débranchée, nous avons montré que les activités débranchées ont des spécificités particulières qui mériteraient des études didactiques approfondies. Plus précisément, nous avons identifié trois paramètres pertinents. Le premier concerne la nature de ces activités, qui peut aller de situations proches de l'activité de recherche en informatique à d'autres qui consistent à faire découvrir des notions très ciblées du domaine. Ce paramètre conduit notamment à s'interroger sur la nature même de l'activité de recherche en informatique, puisque la plupart des activités de recherche en informatique débranchée relèvent de l'informatique théorique, mais très peu des domaines plus appliqués. Les deux autres paramètres concernent le dispositif et sont la place de l'apprenant.e (grandeur nature ou centralisée) et celle de l'ordinateur. Ils ont une influence sur la façon dont les élèves peuvent s'approprier une notion et comprendre les mécanismes élémentaires qui

16. <https://irem.univ-grenoble-alpes.fr/recherche-action/themes/informatique-de-l-ecole-jusqu-au-lycee-417052.kjsp>

17. <members.loria.fr/MDuflot/files/med/doc/Baseball/NavettesSpatiales2nde.pdf>

la sous-tendent. Cette influence mérite d'être analysée de manière de plus rigoureuse d'un point de vue didactique, afin de justifier l'intérêt de tels dispositifs dans les situations.

Si le déploiement en classe de l'informatique débranchée n'en est encore qu'à ses débuts, une analyse plus approfondie devrait aussi donner un crédit supplémentaire à l'utilisation de ces activités en classe.

Références

- Académie des Sciences, . (2013). *L'enseignement de l'informatique en france, il est urgent de ne plus attendre (rapport 513)*.
- Althuser, M., Brassset, N., Rasse, A., Vincent, J.-M., & Wack, B. (2019). Le base-ball multicolore : pensée algorithmique et raisonnement. *IREM de Grenoble*. Consulté sur https://irem.univ-grenoble-alpes.fr/medias/fichier/article-baseball_1587997230572-pdf
- Baron, G.-L., & Bruillard, E. (1997). L'informatique et ses usagers dans l'éducation. *Revue française de pédagogie - Michel Caillot*, 120(1), 153–154. Consulté sur https://www.persee.fr/doc/rfp_0556-7807_1997_num_120_1_3006_t1_0153_0000_2 (Included in a thematic issue : Penser la pédagogie)
- Batcher, K. E. (1968). Sorting networks and their applications. In *Proceedings of the april 30–may 2, 1968, spring joint computer conference* (pp. 307–314).
- Bell, T., & Lodi, M. (2019). Constructing computational thinking without using computers. *Constructivist Foundations*, 14(3), 342–351.
- Bell, T., & Vahrenhold, J. (2018). Cs unplugged—how is it used, and does it work? In H.-J. Böckenhauer, D. Komm, & W. Unger (Eds.), *Adventures between lower bounds and higher altitudes : Essays dedicated to juraj hromkovič on the occasion of his 60th birthday* (pp. 497–521). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-98355-4_29
- Bell, T., Witten, I. H., & Fellows, M. R. (1998). *Computer science unplugged : off-line activities and games for all ages*.
- Boissière, A., Pelay, N., & Rougetet, L. (2017). De la théorie des jeux à l'élaboration d'actions d'enseignement et de vulgarisation : le cas de jeux de type Nim. *Petit x*. Consulté sur <https://hal.science/hal-02070346>
- Brousseau, G. (2011). La théorie des situations didactiques en mathématiques. *Éducation et didactique*, 5(1), 101-104.
- Bundala, D., & Závodný, J. (2014). Optimal sorting networks. *Language and Automata Theory and Applications*, 236-247.
- Collectif. (2017). *L'informatique sans ordinateur* (Vol. 42-43 ; Pole, Ed.). Tangente Education, éditions POLE.
- Da Ronch, M. (2022). *Pratique de l'activité mathématique en médiation : modèles didactiques et conception d'ingénieries* (Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes). Consulté sur <https://www.theses.fr/2022GRALM051>
- Dowek, G. (2011, octobre). Les quatre concepts de l'informatique. In G.-L. Baron, É. Bruillard, & V. Komis. (Eds.), *Sciences et technologies de l'information et de la communication en milieu éducatif : Analyse de pratiques et enjeux didactiques*. (p. 21-29). Patras, Greece : Athènes : New Technologies Editions. Consulté sur <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00676169>
- Drot-Delange, B. (2013, août). Enseigner l'informatique débranchée : analyse didactique d'activités. In *AREF* (p. 1-13). France. Consulté sur https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_00955208 (ACTI Axe1)
- El Hage, S., & Ouvrier-Buffet, C. (2018, novembre). Les démarches de chercheurs en physique et en mathématiques. Enjeux didactiques d'une nouvelle approche épistémologique. *Recherches en éducation*(34). Consulté sur <https://hal.science/hal-03356685> doi: 10.4000/ree.1932
- Esclafit, P., Modeste, S., & Saby, N. (2020). A nim like game and a machine that plays it : a learning situation at the interface of mathematics and computer science. *Teaching Mathematics and Computer Science*, 18, 317-326.
- Grenier, D., & Payan, C. (2003). Situation de recherches "en classe" : essai de caractérisation et proposition de modélisation. In A. IREM de Paris (Ed.), *Actes du séminaire national de didactique des mathématiques 2002*. (p. 201-203).
- Meyer, A., & Modeste, S. (2022, mai). Situation didactique autour d'un jeu de recherche : expérimentation en classes de NSI. In *L'informatique, objets d'enseignement et d'apprentissage. Quelles nouvelles perspectives pour la recherche ?* (p. 100-112). Le Mans, France. Consulté sur <https://hal.science/hal-03697943>

- Modeste, S. (2012). *Enseigner l'algorithme pour quoi ? Quelles nouvelles questions pour les mathématiques ? Quels apports pour l'apprentissage de la preuve ?* (Theses, Université de Grenoble). Consulté sur <https://theses.hal.science/tel-00783294>
- Parberry, I. (1991). On the computational complexity of optimal sorting network verification. In E. H. L. Aarts, J. van Leeuwen, & M. Rem (Eds.), *Parle '91 parallel architectures and languages europe* (pp. 252–269). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
- Pea, R. D. (1987). *Logo Programming and Problem Solving*. Consulté sur <https://telearn.archives-ouvertes.fr/hal-00190546> (technical report, 10 pages)
- Sentance, S., & Csizmadia, A. (2017, mars). Computing in the curriculum : challenges and strategies from a teacher's perspective. *EDUCATION AND INFORMATION TECHNOLOGIES*, 22(2), 469–495. doi: 10.1007/s10639-016-9482-0

Eric Duchêne

Univ Lyon, CNRS, INSA Lyon, UCBL, Centrale Lyon, Univ Lyon 2, LIRIS, UMR5205, Bâtiment Nautibus, 43 Bd du 11 novembre 1918

F-69622 Villeurbanne Cedex, France

e-mail: eric.duchene@univ-lyon1.fr

Aline Parreau

Univ Lyon, CNRS, INSA Lyon, UCBL, Centrale Lyon, Univ Lyon 2, LIRIS, UMR5205, Bâtiment Nautibus, 43 Bd du 11 novembre 1918

F-69622 Villeurbanne Cedex, France

e-mail: aline.parreau@univ-lyon1.fr