



HAL
open science

Perception de la variabilité et facteurs de la curiosité dans les jeux vidéo

Thomas T.C.C. Constant, Guillaume Levieux

► **To cite this version:**

Thomas T.C.C. Constant, Guillaume Levieux. Perception de la variabilité et facteurs de la curiosité dans les jeux vidéo. [Rapport de recherche] CNAM, Conservatoire national des arts et métiers; CEDRIC laboratory, CNAM-Paris, France. 2022. hal-03602170

HAL Id: hal-03602170

<https://hal.science/hal-03602170>

Submitted on 8 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conservatoire National des Arts et Métiers

Laboratoire Cédric, équipe ILJ

Rapport

**Perception de la variabilité et
facteurs de la curiosité dans les
jeux vidéo**

le cnam
cedric

CNAM - Conservatoire National des Arts et Métiers

292 rue Saint Martin, 75003 Paris

Auteurs

- Thomas Constant, CNAM-Cédric, thomas.constant@cnam.fr
- Guillaume Levieux, CNAM-Cédric, guillaume.levieux@cnam.fr

Historique

Version	Date	Commentaires
1.0	17/02/2022	Finalisation et mise en ligne

Table des matières

1	Introduction	3
2	Caractérisation de la curiosité	4
2.1	Les types de curiosité dans les jeux	4
2.2	Curiosité perceptuelle et traitement audiovisuel	6
2.3	Curiosité épistémique et résolution de problème	11
2.4	Curiosité sensorielle et cognitive	13
3	Le rôle de l'incertitude comme mécanisme de la curiosité	16
3.1	La théorie de l'écart d'information	16
3.2	Incertaineté et niveau d'information dans les jeux	19
3.3	Le modèle I/D et types de joueurs	23
4	Influences de la nouveauté et la complexité sur la curiosité	26
4.1	Nouveauté et incongruité	26
4.2	Complexité et difficulté	30
5	Applications en intelligence artificielle	37
5.1	Apprentissage par renforcement et jeux vidéo	38
5.2	Approche par erreur de prédiction : Intrinsic Curiosity Module	39
5.3	Approche par accessibilité de l'information : Episodic Curiosity	42
	Références	45

1 Introduction

Ce rapport décrit les problématiques de conception relatives à la variabilité de l'expérience de jeu, et en particulier comment la perception de la variabilité permet de garder un joueur suffisamment motivé d'une session de jeu à une autre. L'approche décrite dans ce document concerne la perception de la variabilité à l'échelle de l'architecture d'un niveau, et donc de l'influence de certaines pratiques de *level design* sur la motivation du joueur. Chercher à varier l'architecture du niveau permettrait ainsi d'éviter l'impression de répétition chez le joueur, et donc de limiter l'ennui potentiel au sein d'une même session de jeu. Plus le joueur croit rejouer une même séquence, à l'échelle d'une situation ou d'un niveau de jeu, plus il aura la certitude du déroulement de ladite séquence. Une situation perçue par le joueur comme déjà jouée peut le conduire à répéter un même comportement, et il peut être intéressant dans ce cas de chercher à le surprendre pour relancer son attention.

Pour autant, introduire de nouveaux éléments dans un niveau, aussi variés soient-ils, ne signifie pas nécessairement que le joueur va percevoir cette situation de jeu comme nouvelle. Il est ainsi préférable de parler d'impression de nouveauté que de variabilité, car c'est la perception d'éléments nouveaux qui peut notamment conduire le joueur à modifier son comportement. De plus, une situation de jeu, même perçue comme nouvelle, ne va pas nécessairement susciter l'intérêt du joueur. Il est ainsi important d'explorer le concept de nouveauté appliqué à une situation de jeu, concept qui recoupe d'autres notions, comme la difficulté et l'incertitude quant à sa perception et résolution. Il s'agit d'autant d'éléments qui peuvent considérablement influencer le comportement du joueur, et en particulier, sa motivation.

En psychologie, l'attrait pour la nouveauté a été décrit au travers de l'émergence de l'état de curiosité, en particulier dans un contexte d'apprentissage, pour lequel la curiosité va permettre l'acquisition de connaissances et aider au développement de compétences [60, 55]. La curiosité peut être définie comme une émotion, ou plus simplement un état cognitif, afférent à la volonté d'expérimenter se traduisant par une importante motivation conduisant à la recherche d'information et de connaissances sur le fonctionnement d'une situation [10, 69, 46, 72, 40]. L'état de curiosité est ainsi central aux théories de la motivation intrinsèque, favorisant l'apparition d'un comportement d'exploration de l'environnement, où la personne va se confronter à des problèmes complexes, parfois hors de sa portée a priori [64, 56, 34] :

Environments that foster curiosity are complex and varied enough to engender a range of expectations for what might occur, while still offering enough structure to support the development of these expectations. Exploration is the behavior that is energized and directed by curiosity. Exploratory behavior can take many forms including visual search and attention, object manipulation, concept formation, hypothesis testing, and so forth. ([72], page 281)

Si la curiosité a été très étudiée chez l'enfant, peu de recherches se sont focalisées sur l'émergence de la curiosité chez des joueurs, et son influence sur leur motivation à long terme. Les jeux vidéo mettent en scène des environnements virtuels complexes, détaillés, réalisés dans l'optique de transmettre une expérience, un récit, un discours, et susciter des émotions. Manipuler le comportement du joueur, attirer son attention, le motiver à explorer l'environnement est fondamental pour que les concepteurs puissent travailler leurs mises en scène et en mesurer les effets. Comprendre comment, dans le cadre de jeux vidéo, il est possible de susciter la curiosité du joueur apparaît comme nécessaire pour améliorer l'expérience de jeu, et au travers, la motivation du joueur.

Se focaliser sur la curiosité nous permet ainsi d'examiner l'influence de variables de conception de niveaux dans le temps sur la perception des joueurs de la nouveauté, et indirectement sur leur motivation. Ce document va tout d'abord présenter les différents types de curiosité, et leurs caractéristiques en regard à l'expérience de jeu. La deuxième partie est dédiée aux mécanismes liés à la recherche d'information inhérente à l'exploration. Le rôle de l'incertitude, et de la manipulation de l'information et de son contenu, y est présenté. La troisième partie présente quant à elle l'influence de la nouveauté et de la complexité, deux notions primordiales dans l'évaluation d'une tâche ou d'un challenge, sur l'émergence de l'état de curiosité. Les liens avec la difficulté sont aussi abordés. Finalement, une quatrième et dernière partie présente deux applications des théories sur la curiosité pour l'apprentissage automatisé. La curiosité permet ici d'améliorer l'efficacité de l'exploration d'environnement pour des intelligences artificielles.

2 Caractérisation de la curiosité

2.1 Les types de curiosité dans les jeux

L'état de curiosité du joueur est globalement peu étudié, et encore moins à l'échelle de l'impact de certaines mécaniques propres au jeu. Pour autant, quelques articles insistent sur l'importance de la curiosité comme un ensemble de mécanismes cognitifs pouvant influencer la motivation du joueur, et plus globalement la qualité de l'expérience de jeu associée.

Thomas Malone est à l'origine d'une des premières taxonomie des sources de motivation présentes dans les jeux vidéo. Cette classification, réalisée à partir de l'analyse de plusieurs jeux dans l'optique de les réutiliser dans un contexte d'apprentissage, décrit quatre sources de motivations principales : le défi (*challenge*), la curiosité (*curiosity*), la sensation de contrôle (*control*), et la fiction (*fantasy*) [50]. La plus discutée dans la littérature est celle associée au défi, touchant la notion de difficulté qui est un aspect fondamental de l'activité du jeu [31, 38, 5]. Malone y précise qu'un niveau optimal de difficulté favorise la motivation et l'engagement dans la tâche, comme le précise

la théorie du *flow* [23]. Cette analyse a été depuis appuyée par de nombreuses études démontrant notamment l'influence de systèmes d'ajustement de la difficulté (*DDA*) sur le comportement du joueur, comme sa motivation [2, 70], sa confiance [19], ou encore le temps de rétention [3].

Mais la source de motivation la plus directe selon Malone est paradoxalement l'une des moins discutées dans la littérature relative aux jeux, à savoir la curiosité. Comme pour la difficulté, la curiosité répond aussi à un critère d'optimalité, évaluée au travers de la complexité d'information, pour arriver à stimuler pleinement la motivation du joueur.

En se basant sur les travaux de ses contemporains, et en particulier ceux dirigés par Daniel Berlyne, Malone distingue deux types de curiosité :

1. la **curiosité sensorielle** : « It involves the attention-attracting value of variations and changes in the light, sound, or other sensory stimuli of an environment » ([50], p.235), à savoir la curiosité qui touche ainsi plus généralement aux questions de mise en scène dans les jeux (échelle de plans, lumières, couleurs, etc.) ;
2. la **curiosité cognitive** : « [...] is evoked by the prospect of modifying higher-level cognitive structures. » ([50], p.235), dont la source serait un écart entre les structures de savoir de l'apprenant, et ceux que l'environnement sous entend. L'environnement doit conduire l'apprenant à remettre en question ses structures de savoir, qui ne sont pas complètes, consistantes, parcimonieuses, à l'aide de surprises, paradoxes, et cette remise en question implique la curiosité de l'apprenant [50, p. 236].

Ces définitions sont cependant propres à leur auteur et restent quelque peu limitées. Elles ne font pas état, par volonté de synthèse, de la complexité des définitions de la curiosité qui existaient dans la littérature de l'époque. De plus, Malone ne donne pas d'exemple de situation de jeu, mais des recommandations. Ainsi, pour mieux expliciter l'apparition de l'état de curiosité chez le joueur, il est important de revenir sur certaines définitions de la curiosité chez l'humain, et en particulier celles dont s'inspire Malone.

- Selon Thomas Malone, la curiosité fait partie des sources de motivation principales d'un jeu vidéo, au côté du défi, de la sensation de contrôle, et de la fiction.
- Selon lui, la curiosité doit être adressée de manière optimale au joueur en vue de favoriser l'engagement et la motivation du joueur.
- Deux sources de curiosité sont présentées : *sensorielle*, regroupant l'ensemble des stimuli sensoriels qui vont attirer l'attention du joueur ; *cognitive*, pour des situations où le joueur va venir questionner ses connaissances pour en comprendre l'environnement.
- Ces formes de curiosité restent cependant décrites de manière partielles, il convient dès lors de revenir sur les études en psychologie cognitive sur la curiosité et ses mécanismes.

2.2 Curiosité perceptuelle et traitement audiovisuel

Dans un article fondamental sur l'étude de la curiosité, Daniel Berlyne la décrit comme un trait de caractère et aussi un état d'esprit, au caractère multidimensionnel et dans le même temps personnel [10]. Dans un effort d'unification des approches philosophique et constructiviste, Berlyne introduit une taxonomie qui est aujourd'hui encore la plus influente, utilisée et discutée pour qualifier et quantifier la curiosité. Il distingue deux formes de curiosité, perceptuelle et épistémique.

La curiosité perceptuelle (*perceptual curiosity*) [10, page 180] est la forme la plus facilement observable et étudiée, aussi bien chez les animaux que les humains. Ce type de curiosité est suscité par des stimuli visuels, sonores, qui vont attirer l'attention. Plus la personne est confrontée à ces stimuli, plus elle va mettre en place une stratégie d'exploration visant à les examiner, réduisant ainsi l'état de curiosité suscité.

Dans le cadre d'utilisation des jeux vidéo, Malone décrivait étonnamment la curiosité perceptuelle comme curiosité sensorielle, bien qu'il se rattachait aux travaux de Berlyne [49, 50]. Néanmoins, sa définition en reprend les caractéristiques, aisément identifiables dans un jeu, comme tout environnement virtuel qui nécessite de bien guider l'utilisateur et d'attirer son attention à l'aide de stimuli sensoriels. Ces stimuli vont favoriser l'état de curiosité qui va, lui, entraîner la mise en place d'une stratégie d'exploration.

L'exemple le plus simple de ce type de stimuli concerne l'usage de sources lumineuses clignotantes, des *flash* de lumière qui fonctionnent à vitesse variable, en contraste avec le reste des décors. Faire clignoter une source de lumière blanche dans un environnement sombre reste l'un des moyens les plus efficaces pour attirer l'attention d'un individu. Dans des environnements très détaillés, comme dans les jeux récents, faire clignoter des éléments permet d'aider le joueur à les repérer à grande distance.

Si ces stimuli attirent l'attention, ils préfigurent aussi un travail cognitif plus complexe d'analyse du stimuli et de sa reconnaissance. Par exemple, une signalétique peut être conçue pour attirer l'attention et souligner la présence d'une information. Elle implique la reconnaissance de formes et du message associé à cette forme, que cette signalétique soit propre au jeu ou basée sur une rencontre et expérimentée dans les environnements réels : un panneau indiquant la sortie, un jeu d'icônes, etc. Dans le cas où un individu se retrouve devant un panneau dont il ne comprend pas la signification, ce n'est pas uniquement la curiosité perceptuelle qui est piquée par la forme, mais aussi et surtout une curiosité relative aux connaissances de l'individu, comme la curiosité épistémique qui est présentée en section 2.3.

Le *puzzle game Portal* (2007) est à ce titre exemplaire dans sa capacité à utiliser une signalétique très connotée, facilement compréhensible, et dans le même temps l'exploiter en vue de tromper les attentes joueur et développer son intérêt pour un objet ou une situation précise (voir figure 1).

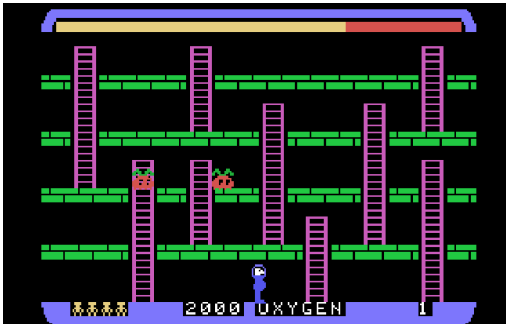


Figure 1 : *Illustration de l'usage d'une signalétique réaliste dans le jeu vidéo Portal.*

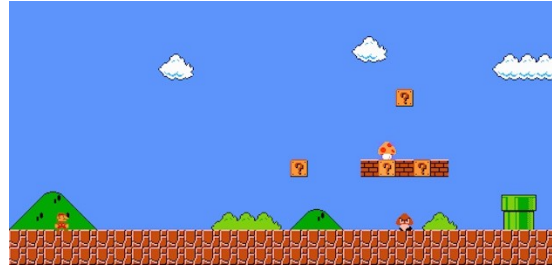
L'exemple de la signalétique est intéressante car met en évidence qu'il est délicat dans un contexte réel de scinder les types de curiosité. Néanmoins, pour étudier les mécanismes sous-jacents à l'état de curiosité, une telle taxonomie peut se révéler utile.

L'usage d'une signalétique et la reconnaissance de formes n'a cependant pas toujours été présente dans les jeux vidéo. En prenant l'exemple des jeux de plate forme, qui impliquent chez le joueur d'analyser rapidement l'environnement pour répondre à un challenge avant tout moteur, il est intéressant d'observer l'évolution du rendu graphique pour stimuler l'attention du joueur. *Space Panic* (1980), l'un des premiers jeux du genre, propose un environnement abstrait et très limité dans sa représentation (voir la figure 2 (a)). Les plate-formes semblent être composées de briques vertes, et les échelles permettant de monter d'une plate-forme à une autre sont violettes. Malgré leurs couleurs, ces éléments font références à une connaissance préalable du joueur, lui permettant de comprendre rapidement qu'il s'agit d'objets utiles pour la progression dans le niveau.

Quelques années plus tard, *Super Mario Bros* (1985) va utiliser une même symbolique pour produire des effets analogues, comme des échelles, des blocs en briques et en pierres pour symboliser la solidité de la plate-forme, des tuyaux impliquant un système d'entrée-sortie, un drapeau à atteindre en fin de course, etc. Mais plus intéressant, le jeu va aussi intégrer des éléments a priori réalistes, mais dont l'apparition dans un tel contexte surprend, et suscite la curiosité du joueur. Ces éléments sont généralement ceux présentant des interactions plus complexes, comme des objets modifiant l'état du personnage-joué (champignon, étoile, feuille, etc.), ou encore des ennemis (tortue, nuage, fleur carnivore, etc.) La figure 2 met en opposition cette évolution des codes du jeu de plate-forme.



(a) Niveau du jeu *Space Panic*



(b) Niveau du jeu *Super Mario Bros*

Figure 2 : *Évolution des codes visuels et de la signalétique dans les jeux de plate-forme.*



(a) Chapitre 1, ascension d'un train



(b) Chapitre 5, ascension d'un immeuble

Figure 3 : *Mise en évidence des chemins de plateforme dans Uncharted 2, (a) en jaune sur fond rouge, puis (b) en vert sur fond jaune.*

D'autres jeux choisissent aussi de passer par l'emploi de stimuli visuels pour attirer l'attention du joueur sur des éléments utiles à leur progression. Le jeu d'action et de plate-forme *Uncharted 2* (2009) utilise un système de couleur pour indiquer au joueur quelle plateforme saisir, et ce dès les premiers niveaux du jeu. Ces plateformes sont mises en évidence par une couleur qui va trancher par rapport à la couleur du fond, comme le montre la figure 3. Il s'agit à la fois d'aider le joueur à mieux se repérer dans des environnements plus réalistes, et donc plus complexes à analyser, et aussi de faciliter l'apprentissage de codes facilitant l'exploration. Une fois ce mécanisme assimilé, le joueur ira naturellement à la recherche de changements forts de contrastes entre les couleurs des éléments pour progresser. Le récent *Doom Eternal* (2020) utilise par ailleurs ce système de couleur pour aider le joueur à limiter son temps d'exploration, pour conserver une grande vitesse d'action basée sur ses réflexes.

Un autre moyen, plus récent, consiste à donner comme capacité au personnage-joué la possibilité de pouvoir visualiser certains éléments clés de l'environnement. Des jeux comme *Assassin's Creed* (2007), la série *Batman Arkham* (2009) ou encore les derniers jeux *Sherlock Holmes* (2014) proposent au joueur d'utiliser un filtre visuel qui



(a) Vision d'aigle dans *Assassin's Creed Unity*



(b) Mode détective dans *Batman Arkham Asylum*



(c) Vue détective dans *Sherlock Holmes : Crimes & Punishments*

Figure 4 : Mécanisme d'altération de l'interface pour faire ressortir les points d'intérêt.

limite l'usage de variations de couleurs aux points d'intérêt, unifiant les zones sans interactions possibles par l'usage d'une seule et même couleur (voir figure 4).

Cette mécanique de dégradation de l'environnement peut être parfois recherchée volontairement par les joueurs, alors qu'elle n'est pas prévue initialement par les concepteurs. Les joueurs de haut niveau, pour qui la qualité de leur performance est la clé du succès, n'hésitent pas à baisser la qualité du rendu graphique d'un jeu pour améliorer considérablement la vitesse de rendu de l'environnement, et éviter ainsi tout lag intempestif qui pourrait nuire à la perception du joueur.

Il s'agit aussi pour eux d'éviter que leur attention ne soit pas détournée de leur objectif principal, à savoir gagner la partie rapidement. Les effets visuels tels que effets de fumée, motion blur, flou cinétique, etc., sont perçus comme des distractions qu'il faut limiter. Il existe à ce titre des didacticiels expliquant comment optimiser le processus de rendu visuel du jeu, en baissant la qualité graphique, comme par exemple pour le jeu de tir à la première personne *Counter Strike GO* (2012)¹.

Si l'usage de la lumière, et en particulier de la couleur, est fondamental pour diriger l'attention du joueur et piquer sa curiosité perceptuelle, d'autres techniques, comme le design sonore et les mouvements de caméra, peuvent être utilisées en ce sens [37].

La conception de l'environnement sonore est tout aussi importante que celui visuel lorsqu'il s'agit de manipuler le comportement du joueur. Les jeux d'horreur sont ceux qui tirent le plus profit d'environnements sonores complexes et détaillés. Selon des choix de conception, ces environnements sonores peuvent être clairs à analyser pour aider le joueur dans sa progression, ou le noyer sous une surcharge de sons et musiques pour contribuer à un effet d'étouffement voulu par le genre lui-même.

Par exemple, dans *Alien Isolation* (2014), jeu d'horreur inspiré du film de 1979, le joueur doit écouter l'environnement pour prédire le comportement de la créature qui le traque, et qui ne peut être détruite. La reconnaissance des patterns sonores du monstre (grognements, bruits de pas, interactions avec l'environnement, etc.), la découverte d'autres sons produits par l'environnement (bruit de porte, alarme, radio,

1. Voici un didacticiel donné à titre d'exemple : <https://blog.nzxt.com/how-to-optimize-your-csgo-settings-like-a-pro/>



(a) *Alone in the Dark*, 1992



(b) *Alone in the Dark 2*, 1993

Figure 5 : *Cadrage et échelle de plan dans la série Alone in the Dark.*

etc.), permettront au joueur de manipuler à son tour l'intelligence artificielle. Cette dernière est particulièrement sensible aux stimuli générés par l'environnement qui vont la pousser à explorer, en vue de capturer le joueur.

Dans un genre différent, le *puzzle game* *The Witness* (2016) crée quant à lui des énigmes basées sur l'exploration sonore. Il cherche à guider le joueur par des séries de sons qui semblent en léger décalage avec l'environnement, comme un chant d'oiseau dont le joueur ne peut en trouver la source, et qui est finalement la clé d'une séquence sonore plus complexe.

Autre technique de mise en scène utilisée pour attirer l'attention du joueur, est l'usage de la caméra. Par exemple, lorsque la caméra est indépendante des mouvements du personnage, il est possible d'user d'effets de cadrage pour focaliser le point de vue sur un élément particulier. Dans les jeux à la première personne, cela peut impliquer de faire perdre au joueur le contrôle de la caméra, et donc à forcer le changement de point de vue. D'autres jeux pourront aussi utiliser le hors champ comme stimulus, appelant le joueur à explorer au delà des limites du cadre imposé. La trilogie originale de jeux d'horreur *Alone in the Dark* (1992) s'est notamment inspirée d'effets de mise en scène cinématographiques, en utilisant des effets de cadrage très resserrés, déconnectés du mouvement du personnage, comme le montre la figure 5. Les premiers épisodes de la série *Resident Evil* (1996) reprendront ces mécanismes, suivi à leur tour par d'autres jeux d'horreur.

Plus globalement, une modification de la direction artistique du niveau, ou d'un élément du niveau, devrait aussi stimuler la curiosité perceptuelle du joueur. Les niveaux catégorisés par thématiques, comme par exemple les cavernes, plaines, mondes sous-marins, etc., dans *Super Mario Bros.*, permettent de relancer l'intérêt du joueur lorsqu'ils sont parcourus une première fois. Une nouvelle texture sur un objet, dont la forme et la fonction ne varie pourtant pas, peut aussi permettre de focaliser l'attention du joueur sur ce dernier. C'est une fois l'objet en main que le joueur va pouvoir expérimenter, et qu'un conflit, ou une contradiction de ses attentes, va pouvoir stimuler sa

curiosité épistémique. Mais au préalable, ce sont les mécanismes relatifs à la curiosité perceptuelle qui vont le conduire à s'intéresser à cet objet.

Comme décrit plus haut, les mécanismes permettant de stimuler la curiosité perceptuelle chez un joueur sont nombreux, et ont déjà été couramment utilisés dans des titres de genres divers, à différentes époques, et pour différentes cibles de joueurs. A l'inverse, la curiosité épistémique, ou cognitive selon Malone, de part sa nature semble moins se prêter à un analyse aussi directe. De nouveau, il est nécessaire de revenir à la littérature spécifique à ce type de curiosité pour en comprendre les liens possibles avec l'activité de jeu.

- Daniel Berlyne décrit la curiosité perceptuelle comme un état précédent la mise en place d'une stratégie d'exploration, état suscité des stimuli visuels et sonores.
- Ces stimuli attirent l'attention de l'individu, préfigurant un travail cognitif d'analyse du stimuli, et de la reconnaissance du signe associé.
- Les mécanismes permettant de stimuler la curiosité perceptuelle sont nombreux dans les jeux vidéo ; attirer l'attention du joueur par un ensemble de stimuli visuels et sonores permet de le pousser à explorer son environnement.
- Par exemple, des filtres de couleurs sont utilisés pour mettre en évidence un élément dans un décor, et des sons spécifiques pour aider le joueur à analyser l'environnement.

2.3 Curiosité épistémique et résolution de problème

Toujours dans le même article, Berlyne introduit en plus de la curiosité perceptuelle le concept de curiosité épistémique [10]. Cette dernière, étudiée en majorité chez l'humain, reste plus complexe à appréhender, notamment en ce qui concerne ses mécanismes cognitifs sous-jacents.

La curiosité épistémique (*epistemic curiosity*) [10, page 189] est suscitée par la nécessité de répondre à des questions, voire des problèmes, qui vont pousser la personne à examiner certaines informations plutôt que d'autres. Cette curiosité est motivée par la volonté d'une personne de construire un éventail de savoirs, de connaissances.

Cette curiosité peut ainsi être conceptualisée comme la capacité d'une personne à montrer un intérêt pour une situation qui implique la résolution d'un problème. La personne met alors en place une à plusieurs stratégies visant à récupérer des informations, comme l'exploration des possibles, puis à mettre en place des solutions, au travers de moyens d'expérimentation, comme un schéma essai/erreur, ou plus simplement se poser des questions [10].

Pour Berlyne, la notion de conflit est ainsi centrale à l'émergence de la curiosité. Le conflit en est le déclencheur, dans le sens où il y a conflit lorsque une personne voit ses attentes déjouées lors de l'évaluation d'une situation [11]. L'effet de surprise va ainsi, a minima, pousser à une remise en question, qui préfigure la mise en place d'une stratégie conduisant à une exploration, exploration utile pour récupérer les connaissances nécessaires à la résolution du problème. La sélection des informations est ensuite influencée par le cadre dans lequel le problème est présenté, et en particulier de la manière dont la question est posée. Ce dernier point est central dans les études qui suivront sur l'émergence de la curiosité dans un contexte d'apprentissage.

Malone préfère parler de curiosité cognitive et propose ainsi un nouveau formalisme, jugeant les approches de la curiosité comme encore trop peu orientées vers la description des mécanismes cognitifs sous-jacents [50]. Il faut se tourner vers des textes antérieurs pour confirmer qu'il y a bien un lien entre la curiosité épistémique et la curiosité cognitive. Cette dernière terminologie, propre à Malone, fait pourtant bien référence aux travaux de Berlyne [48, 49].

La définition de la curiosité cognitive de Malone est cependant plus difficile à appréhender que celle de Berlyne, dont elle est finalement assez proche. Elle repose sur le concept de « structures cognitives », des processus cognitifs que chaque personne met en place pour reconnaître, acquérir et comprendre des informations sur son environnement. Malone précise que la curiosité cognitive est suscitée lorsqu'une personne modifie ses structures cognitives car elle ressent un écart entre son niveau d'information et celui impliqué par l'environnement. Selon lui, la clé pour déclencher cette curiosité est de concevoir des environnements qui vont pousser la personne à remettre en question ses connaissances sur la situation.

We suggest that three of good scientific theories, *completeness*, *consistency*, and *parsimony*, are also characteristics of well-formed cognitive structures. Curiosity can be stimulated, therefore, by designing environments that make people think their knowledge structures lack one or more of these characteristics. ([50], page 236)

La définition de Berlyne de la curiosité épistémique, articulée notamment autour du conflit, apparaît finalement comme plus accessible pour appréhender les caractéristiques des situations de jeu qui vont favoriser l'apparition d'un tel état. Jouer avec les attentes du joueur, les transgresser, chercher à le surprendre, sont autant d'éléments qui peuvent générer un conflit, à des degrés divers. Il ne s'agit pas uniquement d'ajouter un nouvel objet, ou intégrer une nouvelle mécanique, mais de les introduire en vue de transgresser ses prédictions.

A priori, le nombre d'exemples de situations de jeu suscitant la curiosité épistémique peut être particulièrement important, et ce d'autant plus que la notion de conflit est personnelle ; certains joueurs peuvent être surpris par une situation, d'autres ne ressentir aucune émotion. Pour mieux comprendre et expliciter les mécanismes permettant

l'émergence de la curiosité épistémique dans un jeu, nous proposons de circonscrire la notion de conflit à l'échelle du traitement de l'information, comme le proposent notamment Berlyne, et Loewenstein à sa suite, en analysant le rôle de l'incertitude dans l'évaluation et l'exploration des informations à disposition. Ces travaux sont présentés et discutés en section 3. Dans un second temps, nous analyserons aussi l'influence de la nouveauté et de la complexité, qui ont aussi un impact sur la capacité des individus à vouloir récupérer des informations, et apprendre de leur environnement. Ces mécanismes sont discutés en section 4. Les articulations avec le jeu y seront aussi discutées.

- En complément de la curiosité perceptuelle, Daniel Berlyne décrit la curiosité épistémique, suscitée par la nécessité de répondre à des questions, voire des problèmes, qui vont pousser l'individu à récupérer des informations au sein de l'environnement.
- Le conflit est l'élément déclencheur de la curiosité épistémique. Il y a conflit lorsqu'un individu voit ses attentes transgressées. L'effet de surprise qui en découle va ainsi le pousser à une remise en question.
- Dans les jeux vidéo, de nombreuses situations sont conçues pour surprendre le joueur, ou jouer avec ses attentes.
- Pour affiner l'analyse, la notion de conflit peut être étudiée à l'échelle du traitement de l'information dans les jeux, et en particulier du rôle de l'incertitude dans les situations de jeu et son influence sur la curiosité.

2.4 Curiosité sensorielle et cognitive

En complément de la curiosité perceptuelle et la curiosité épistémique, Litman et al. ajoutent à ces définitions celle de **la curiosité sensorielle** (*sensory curiosity*) [43]. Les auteurs partent du constat que si les curiosités présentées par Berlyne sont bien décrites au travers de stimuli et de stratégies d'exploration associées, l'intensité même de la curiosité n'est pas mesurée. Ils proposent donc d'étudier et de mesurer un autre type de curiosité, complémentaire à la curiosité perceptuelle, qui motive la recherche d'informations nouvelles, et l'expérience de d'expériences sensorielles inhabituelles.

La curiosité sensorielle cherche à considérer l'importance du ressenti dans l'état de curiosité, mais veut aussi se distinguer d'une quête d'émotions fortes et d'expériences dites « à risque » : comme dans certaines situations qu'un policier ou un pompier peuvent rencontrer par exemple, ou encore un sportif dans le cas de sports extrêmes, comme le saut en parachute ou à l'élastique. Leur article propose ainsi, en complément des échelles d'évaluation des curiosité perceptuelle et épistémique, un outil spécifique à la curiosité sensorielle.

Cette définition de la curiosité sensorielle est introduite plus tardivement que les travaux de Malone, qui par curiosité sensorielle faisait référence à la curiosité percep-

tuelle (voir section 2.2). La mesure de la curiosité sensorielle dans des jeux vidéo peut s'avérer intéressante s'il est possible d'isoler la recherche de sensations de celle d'informations nouvelles, sans que le dispositif expérimental ne soit trop contraignant. La recherche de sensations fortes, quant à elle, semble assez restreinte dans le cadre de jeux, à l'exception peut-être des jeux d'argent où les joueurs pourraient ressentir une prise de risque suffisamment forte pour initier un tel état. Il est possible que certaines expériences ludiques, en réalité virtuelle notamment de part leur capacité à immerger pleinement les joueurs, pourraient s'apparenter à celles décrites par Litman et al., mais il faudrait encore le démontrer. Il serait aussi nécessaire, dans ce cas, de tenir compte que certains joueurs présentant une aversion au risque pourraient ne pas faire état d'une telle curiosité. Cela risquerait de restreindre considérablement l'étude de la curiosité à un public moins représentatif, sensible à ces seules situations. Pour ces raisons, nous choisissons pour ce document de ne pas détailler les liens entre ce type de curiosité sensorielle et les jeux vidéo. Il pourra s'agir d'une étude à mener à part entière, dédiée à la sensation de risque vécue au sein d'expériences vidéoludiques en réalité virtuelle.

Les caractéristiques de la curiosité sensorielle ne sont toutefois pas indépendants de celles de la curiosité perceptuelle et de la curiosité épistémique. La curiosité sensorielle fait partie d'une conceptualisation plus générale de Litman et al. sur l'état de curiosité, qui met en évidence la porosité entre les deux types de curiosité définis par Berlyne [45]. Bien que curiosité perceptuelle et curiosité épistémique impliquent des mécanismes cognitifs différents, l'émergence d'une curiosité épistémique peut impliquer la recherche de stimuli sensoriels [45, pages 85-86]. Dès lors, pour mieux mettre cette perméabilité entre les curiosités, Litman et al. préfèrent considérer une seule et même curiosité, qui s'exprime au travers de deux dimensions, la recherche d'information et la stimulation sensorielle. C'est dans cette optique que les auteurs introduisent les concepts de curiosité sensorielle et de **curiosité cognitive**, terminologie présentée ici par Reio Jr. et al. :

(a) information seeking, or cognitive curiosity, which stimulates information-seeking, exploratory behavior and (b) sensory curiosity, which stimulates sensation-seeking, exploratory behavior. ([64], page 118)

Dans cette optique, Reio Jr. et al. proposent de vérifier l'existence de ces différents types de curiosité via une analyse factorielle des taxonomies énoncées au préalable dans la littérature [64]. Ils reviennent notamment sur la taxonomie à deux dimensions de Berlyne entre curiosité perceptuelle et épistémique (voir sections 2.2 et 2.3) [10], fondamentale pour l'étude de la curiosité [46, 45, 49], ou encore celle revue par Litman et al. [45, 43].

Les auteurs testent ces modèles au travers une étude comparative et mettent en évidence que le plus approprié est un modèle de curiosité basée sur trois types : un type basé sur la forme de curiosité cognitive, dite *information seeking*, centré sur l'exploration et la recherche d'information que l'on retrouve notamment chez Berlyne ; et deux de types sensorielle regroupés sous la forme de curiosité sensorielle, dites *physical*

thrill seeking et *social thrill seeking*. Comme le soulignait déjà Litman et al., curiosité perceptuelle et sensorielle ne sont pas ici indépendantes, l'une pouvant englober l'autre.

Malgré une volonté de vouloir simplifier les multiples approches et définitions de la curiosité autour de la curiosité sensorielle et cognitive, peu de recherches réutiliseront le terme de curiosité cognitive. La littérature a conservé comme base d'étude la taxonomie de Berlyne, et a creusé en particulier la notion de curiosité épistémique. Néanmoins, ces recherches ont montré que s'il est utile d'étudier indépendamment les mécanismes de ces deux types de curiosité, notamment pour observer l'influence de l'environnement, comme dans notre cas le level design de jeux vidéo, ce sont aussi et surtout deux dimensions d'un même état qui s'exprime au travers d'un comportement d'exploration.

Pour ces raisons, ainsi que celles évoquées en sections 2.2 et 2.3, nous choisissons dans cette étude de faire référence à la taxonomie de la curiosité de Berlyne, et celles héritées de ses travaux, à savoir les curiosités de type perceptuelle et sensorielle d'un côté, épistémique de l'autre.

- Litman et al. décrivent la curiosité sensorielle comme complémentaire à la curiosité perceptuelle, tenant ainsi compte du ressenti de l'individu, mais se différenciant d'une recherche exclusive d'expériences à risques.
- Cette forme de curiosité est plus délicate à évaluer. Cela nécessiterait d'arriver à isoler la recherche de sensation de la recherche d'information. De plus, il faudrait circonscrire l'étude à un public moins représentatif, mais sensible à ces seules situations.
- Litman et al. précisent que si curiosité perceptuelle et curiosité épistémique soulignent des mécanismes cognitifs différents, l'émergence d'une curiosité épistémique peut impliquer la recherche de stimuli sensoriels. Ils proposent ainsi de considérer une seule forme de curiosité, dite cognitive.
- Reio Jr. et al. proposent quant à eux un modèle de curiosité basé sur trois formes :
 1. une forme cognitive, dite *information seeking*, centrée sur l'exploration et la recherche ;
 2. deux formes sensorielles, dites *physical thrill seeking* et *social thrill seeking*.
- Malgré une volonté de simplifier les approches et définitions de la curiosité, cette dernière taxonomie sera peu reprise et discutée dans la littérature.
- Dans le cadre de cette étude, nous choisissons de nous focaliser sur les formes de curiosité perceptuelle et épistémique, tout en tenant compte que ces formes de curiosité sont rarement indépendantes.

Les facteurs influençant l'émergence de ces types la curiosité sont détaillés dans les prochaines sections. Le rôle de l'incertitude tout d'abord, étudié en particulier pour la curiosité épistémique mais qui touche aussi les autres types, sera abordé sous l'angle de la conception de jeux. L'influence de la nouveauté, de la complexité et de la difficulté, seront décrits dans la partie suivante.

3 Le rôle de l'incertitude comme mécanisme de la curiosité

Comme explicité en section 2, le rôle de la curiosité est de motiver la recherche et récupération de nouvelles informations et connaissances dans une situation donnée. Cet état est déclenché par un stimuli sensoriel dans le cas de la curiosité perceptuelle, et déclenché par l'apparition d'un conflit, ou d'attentes non satisfaites, pour la curiosité épistémique [10, 42, 46, 35]. Le jeu, et le jeu vidéo en particulier, est un objet où l'utilisateur est constamment invité à expérimenter librement [1, 58], résoudre des problèmes et mettre en perspective ses choix [67, 26, 18], et le plus souvent de répondre à ce problème de manière créative [27]. Là où la curiosité perceptuelle est provoquée par le traitement audiovisuelle du jeu, la curiosité épistémique du joueur serait donc majoritairement suscitée par la conception des situations de jeu en elles-mêmes, et leurs mécaniques sous-jacentes. De nouveau, pour mieux saisir les éléments des jeux qui peuvent conduire le joueur à développer sa curiosité au travers de la recherche et l'acquisition d'information, il semble nécessaire de revenir tout d'abord sur les travaux respectifs en psychologie cognitive.

3.1 La théorie de l'écart d'information

En synthèse aux recherches sur la curiosité chez l'humain, et pour répondre aux problèmes soulevées par les différentes approches décrivant les mécanismes conduisant à susciter la curiosité, George Loewenstein s'intéresse en particulier aux mécanismes déclenchant la recherche d'information, l'exploration, relatif à la curiosité [46]. Cette proposition, qu'il nomme théorie de l'écart d'information (« *the information-gap perspective* »), se veut transversale aux approches et recherches préalables sur l'émergence de la curiosité chez l'humain :

The information-gap theory views curiosity as arising when attention becomes focused on a gap in one's knowledge. Such information gaps produce the feeling of deprivation labeled curiosity. The curious individual is motivated to obtain the missing information to reduce or eliminate the feeling of deprivation. ([46], page 87)

L'écart d'information est le rapport entre deux quantités d'information, ce que la personne possède, qui peut être évaluée selon des critères objectifs ; sur ce que la personne cherche à savoir, qui est plus complexe à évaluer car doit tenir compte de l'appré-

ciation subjective de la personne sur ses connaissances. Loewenstein appuie notamment cette théorie sur les études sur le jugement humain en situation d'incertitude, en particulier les prédictions et les évaluations subjectives de gain explicitées par la théorie des perspectives [32]. L'état de curiosité est donc sensible à une estimation possiblement biaisée de la qualité de l'information, estimation qui fluctue dans le temps, et qui est sujette à la variété et à la complexité même de l'information. La curiosité d'une personne augmenterait ainsi avec la quantité de connaissances, et serait plus marquée envers des objets ou situations pour lesquels elle aurait certaines connaissances, et moins forte pour des situations pour lesquelles elle n'en aurait pas [46, 35]. Plus précisément, Kang et al. ont montré que la quantité d'informations présentée au préalable à la personne a un impact sur sa curiosité : une première information va susciter la curiosité, alors qu'un trop plein va tendre à la réduire [33]. Il existerait donc un niveau optimal d'information, propre à chacun, permettant de susciter pleinement la curiosité. Suivant les résultats de Loewenstein, Kang et al. ont aussi avancé que les personnes sont plus curieuses lorsqu'elles ont une première évaluation, voire une simple idée, de la réponse à un problème, mais manquent de confiance en cette évaluation. A l'inverse, si elles sont trop confiantes dans leurs évaluations, elles déploient une curiosité moindre face à la situation [33].

Loewenstein précise aussi que la curiosité est un état qui s'exerce à la fois volontairement, dans le cas de jeux d'argent, de jeux de mise, ou d'enquêtes ; et involontairement, spontanément, dans des situations qui vont questionner la personne, comme dans des situations problèmes, en cherchant à anticiper un évènement, ou encore lorsque cette personne voit ses prédictions contredites [46]. L'utilisation de feedback joue dès lors un rôle important puisqu'ils vont permettre à la personne de réévaluer la qualité de l'information, et donc modifier à terme l'écart d'information qui est à la source de son état de curiosité.

Graham Pluck et Helen Johnson explorent plus précisément les mécanismes sous-jacent à l'écart d'information dans un cadre d'apprentissage, et sa réévaluation pour assurer un niveau de curiosité élevé chez l'élève [60]. L'écart d'information doit, dans ce cas, être considéré selon une taille dite optimale, ne devant être ni trop importante, au risque de faire perdre toute motivation à l'élève, ni trop faible, au risque de ne pas susciter la curiosité. Le rôle du professeur serait ainsi de jouer sur l'utilisation de feedback pour manipuler l'écart d'information. Pluck & Johnson précisent ainsi que l'élève doit être sur le point de résoudre le problème, comme s'il se disait : « Je l'ai sur le bout de la langue ! »

A ce sujet, Litman et al. mesurent deux mécanismes de l'écart d'information jouant sur la curiosité épistémique, dont « TOT » (pour « *Tip Of the Tongue* », soit « sur le bout de la langue ») et « DON'T KNOW » [44]. TOT décrit un écart d'information plus restreint, soit une curiosité vécue comme plus intense impliquant une stratégie d'exploration poussée, et une tension liée à l'incertitude qui tend à générer une sensation jugée comme désagréable chez la personne. DON'T KNOW implique de son côté un écart d'information plus important, une curiosité moindre, une exploration plus limitée,

mais des sentiments positifs lié à un intérêt pour la tâche elle-même, et un plaisir certain à vouloir la résoudre. Cette analyse est, par ailleurs, au centre du modèle I/D de la curiosité épistémique, décrit en section 3.3.

Cette différenciation peut se révéler être intéressante dans le cadre de l'analyse du comportement du joueur, permettant de catégoriser des situations de jeu qui vont générer une certaine frustration mais pour laquelle le joueur explore activement l'espace, d'un état de curiosité associé à une situation a priori plus gratifiante mais pour laquelle le joueur est plus passif.

Considérant l'influence de ces deux mécanismes sur l'humeur de la personne, le rôle de l'enseignant est crucial pour garder l'élève curieux tout au long de l'exercice. Il est pour lui important de vérifier la taille de l'écart en questionnant régulièrement l'étudiant sur sa compréhension actuelle du problème. Cela reviendrait à stimuler sa curiosité tout en permettant à l'enseignant d'adapter son exercice. Pluck & Johnson donnent ainsi un exemple dans le cas de l'apprentissage de la langue, où il est demandé à l'apprenant d'utiliser le vocabulaire de la langue à apprendre pour résoudre un problème donné [60]. Ils présentent aussi une situation où un apprenant décrit à un autre un problème, dont il n'a qu'une image. La curiosité va ici initier une stratégie d'exploration qui implique, par effet de bord, l'apprentissage des connaissances récupérées, ne serait-ce qu'à court terme. Il est possible de retrouver ce type d'exercice dans le cas de formations médicales, qu'il s'agisse de puzzles ou de jeux de rôles [57], ou encore pour l'orientation des étudiants [68]. Le rôle de la curiosité dans l'apprentissage des joueurs/apprenants n'y est cependant pas mesurée. Néanmoins, ces exemples peuvent ouvrir à de nombreuses applications dans les jeux dédiés à un apprentissage, et où l'état de curiosité serait en particulier recherché. Le rôle du médiateur, qu'il s'agisse d'un autre joueur ou d'une intelligence artificielle, est alors d'assurer un niveau de curiosité optimal en cours de partie.

Loewenstein souligne quelques limites relatives à la théorie de l'écart d'information [46]. La première est qu'il est possible de rechercher des informations sans se montrer particulièrement curieux. Il faut ainsi considérer les attentes de la personne et ses intérêts préexistants à la recherche d'information. A ce titre, d'autres études ont aussi soulignées que la manière dont l'information est présentée à la personne peut modifier l'intérêt que la personne y porte, et donc influencer considérablement son niveau de curiosité [10, 43]. Les autres limites sont d'ordre socio-culturel, touchant aux questions du genre, et à la spécificité des personnes néophobiques, qui dans ce cas ne chercheront pas à réduire l'écart d'information.

La théorie de l'écart d'information présente un double intérêt : d'une part, elle permet de mieux comprendre les mécanismes cognitifs menant une personne à se montrer curieux dans une situation donnée ; d'autre part, elle aide à construire des ponts entre des dispositifs pour lesquels il est pertinent d'évaluer la curiosité, comme un contexte scolaire ou encore, celui qui nous intéresse, un contexte d'utilisation de jeux vidéo.

- La théorie de l'écart d'information de George Loewenstein stipule que, lorsqu'il existe un écart entre les connaissances d'un individu et ce qu'il cherche à savoir, un individu va se montrer plus motivé à explorer l'environnement en vue de réduire cet écart.
- Il existerait un niveau optimal d'information permettant de susciter la curiosité d'un individu.
- De plus, les individus se montrent plus curieux lorsqu'ils ont une première évaluation de la réponse à un problème. Ils manquent néanmoins de confiance en cette évaluation.
- L'utilisation de feedback permet de réévaluer la taille de l'écart d'information, et de maintenir ou combler un état de curiosité.
- Deux mécanismes de l'écart d'information ont une influence sur le comportement de curiosité épistémique selon Litman et al. :
 1. « TOT » (pour « *Tip Of the Tongue* » décrit un écart d'information plus restreint, soit une curiosité vécue comme plus intense impliquant une stratégie d'exploration poussée, et une tension liée à l'incertitude qui tend à générer une sensation jugée comme désagréable chez la personne.
 2. « DON'T KNOW » implique de son côté un écart d'information plus important, une curiosité moindre, une exploration plus limitée, mais des sentiments positifs lié à un intérêt pour la tâche elle-même, et un plaisir certain à vouloir la résoudre.
- L'écart d'information est ainsi sensible à l'intérêt qu'une personne porte à une situation ; un manque d'intérêt limitant l'effort fourni en vue de récupérer d'autres informations.

3.2 Incertitude et niveau d'information dans les jeux

Pour mettre en évidence l'état de curiosité du joueur, l'analyse de ses stratégies de jeu, notamment celles liées à l'exploration, permettrait d'aider à circonscrire les mécaniques qui peuvent l'influencer. Cependant, prédire ces stratégies en amont, en vue d'aider la conception des situations de jeu, se révèle particulièrement complexe et imprécis. Ces stratégies sont personnelles, variables d'un joueur à un autre, s'appuient sur l'expérience, de débutant à expert, et sur le style de jeu de chacun, et sont sensibles au cadre d'utilisation du jeu et son genre [7, 54]. Il semble ainsi plus compréhensible de se focaliser sur le niveau d'information disponible, et celui à disposition, ne serait-ce que du point de vue du concepteur qui a à sa disposition quelques outils et moyens pour les manipuler, au travers notamment de la gestion des sources d'incertitude qui seront décrites en suivant dans cette section.

S'appuyant sur les travaux de Malone, Bateman classifie quant à lui la curiosité au registre des émotions du *Easy fun* qui regroupe des émotions telles que la surprise et l'émerveillement [8]. Par opposition au *Hard fun* généré par les défis et la volonté de maîtrise d'un jeu, *Easy fun* concerne le plaisir direct procuré par un jeu, au travers de son interface, des contrôles, de l'univers du jeu, ou encore de la fiction produite. Comme Malone, Bateman relie l'émergence de la curiosité chez le joueur à l'incertitude, et plus spécifiquement au caractère aléatoire d'éléments qui vont modifier le déroulement d'une situation de jeu. Si un joueur est persuadé du dénouement d'une situation, cette situation ne présente plus d'intérêt pour lui et il ne pourra donc atteindre un état de curiosité.

L'incertitude est considéré comme une caractéristique fondamentale à l'expérience de jeu, centrale dans la prise de décision du joueur et du plaisir de jeu qui en découle. Roger Caillois, dans une célèbre étude sociologique de l'activité de jeu au travers de pratiques sportives, théâtrales et même judiciaires, définit 6 caractéristiques essentielles au bon déroulement d'une expérience ludique [15] : libre, séparée dans l'espace et le temps, incertaine, improductive, réglée, et fictive. L'incertitude est cruciale car elle permet au joueur de ne pas pré-déterminer le déroulement du jeu, ni le résultat de ses actions. L'incertitude permet au joueur d'avoir une certaine latitude dans son jugement et ses choix pour qu'il puisse inventer une réponse au problème donné [15]. Il est possible de faire l'hypothèse que ce jugement lui permet de mettre en place une stratégie d'exploration et de résolution, dont il ne peut prédire avec certitude l'efficacité.

Le jeu est en outre une activité incertaine. Le doute doit demeurer jusqu'à la fin sur le dénouement. Tout jeu d'adresse comporte par définition, pour le joueur, le risque de manquer son coup, une menace d'échec sans laquelle le jeu cesserait de divertir. En fait, il ne divertit plus celui qui, trop entraîné ou trop habile, gagne sans effort et infailliblement. Un déroulement connu d'avance, sans possibilité d'erreur ou de surprise, conduisant clairement à un résultat inéluctable, est incompatible avec la nature du jeu. Il faut un renouvellement constant et imprévisible de la situation [de jeu]. ([15], pp. 38-39)

La gestion de l'incertitude implique ainsi nécessairement le renouvellement d'une situation de jeu, et donc peut avoir une influence sur le sentiment de variabilité, ou de nouveauté.

Malone décrit lui spécifiquement l'incertitude quant à la finalité d'une décision comme caractéristique du challenge, le challenge étant l'une des principales sources de motivation des jeux (voir section 2.1). Suivant les recherches menées par McClelland et al., Malone précise que pour obtenir un niveau de motivation suffisant chez le joueur, il faut que l'incertitude soit « maximale » ; autrement dit que la probabilité de succès du joueur pour un challenge donné soit de 50% [51]. Il décrit ainsi quatre techniques visant à manipuler l'incertitude au sein d'une situation de jeu [50] :

1. Varier les niveaux de difficulté, qui peuvent être déterminés automatiquement

en fonction de que le joueur a déjà fait, ou choisis par le joueur, ou encore déterminés par le niveau d'un opposant.

2. Proposer plusieurs types de buts, qui peuvent présenter différents niveaux de difficulté, ou encore varier leur proximité dans le temps et leur nature, pour améliorer la performance du joueur sur une tâche précise.
3. Cacher l'ensemble ou une partie des informations au joueur, qui doit alors explorer son environnement pour les récupérer, avec plus ou moins d'indices.
4. Et plus simplement, manipuler le caractère aléatoire d'une situation de jeu, comme le tirage d'un dé par exemple.

Ces techniques ne sont pas indépendantes et peuvent être croisées en vue d'augmenter le niveau d'incertitude du jeu, ou d'une seule situation de jeu.

Thomas Malaby et Greg Costikyan ont par la suite présenté des pistes de conception en vue d'utiliser l'incertitude pour améliorer l'engagement et le plaisir de jeu. Malaby définit l'activité de jeu par sa contingence artificielle, c'est-à-dire par une somme d'évènements arbitraires et aléatoires [47], là où Costikyan préfère parler d'incertitude, reprenant la terminologie de Caillois [21]. Malgré cette divergence, Malaby et Costikyan considèrent tout deux qu'il est du rôle du concepteur de jeu de développer et de conserver un attrait fort pour des situations de contingence, en manipulant les sources d'incertitudes associées.

Malaby présente quatre sources de contingences, Costikyan dix sources d'incertitude. Dans le cadre de cette étude, et par volonté de synthèse, nous choisissons de présenter les sources de contingence et d'incertitudes les plus utiles pour influencer sur la perception de l'information du joueur dans le cas de la résolution d'un problème. Il peut ainsi s'agir de pistes permettant indirectement de manipuler l'écart d'information, en vue de favoriser le développement de la curiosité épistémique.

- **La contingence stochastique** (*stochastic contingency*) [47], ou contingence pure, qui se définit par des résultats imprévisibles, comme la conséquence d'un processus suffisamment complexe pour produire des résultats chaotiques (par exemple un jeu de carte bien mélangé, une blessure d'un des participants, ou encore la latence de la connexion lors d'un jeu en ligne). Costikyan, comme Caillois et Malone avant lui, préfère parler de **caractère aléatoire** (*randomness*) [21] et précise que les joueurs peuvent avoir une perception biaisée de l'aléatoire, la jugeant injuste. Le caractère aléatoire s'observe aussi dans la gestion d'évènements, favorisant un certain renouveau des situations de jeu.
- **La contingence de performance** (*performative contingency*) [47], liée à l'exécution de l'action par l'un des participants (joueurs ou personnages non joueurs), qui peut se solder aussi bien par une réussite qu'un échec. Il s'agit d'une source de contingence importante pour tout jeux qui implique une performance physique ou cognitive importante. Costikyan de son côté choisit de découper cette source de contingence en plusieurs sources d'incertitude [21] :
 - **L'imprévisibilité du joueur** (*player unpredictability*) tout d'abord, touchant le comportement des autres joueurs, aussi bien que dans jeux mult-

joueurs que les jeux où les personnages non joueurs sont contrôlés par une intelligence artificielle.

- **L’incertitude performative** (*performative uncertainty*), pour laquelle Costikyan précise qu’elle peut se révéler être encore plus importante lorsque des joueurs de différents niveaux s’opposent, et que la difficulté n’est pas adaptée à chacun.
- **L’incertitude liée à la perception** (*uncertainty of perception*) [21], reliée à la difficulté de percevoir ce qui se passe dans le jeu. Il s’agit de choix de conception visant rendre volontairement moins accessible les informations visuelles et sonores, notamment par un trop plein de stimuli audiovisuels.
- **L’information cachée** (*hidden information*) [21] commune à de multiples situations de jeux, intimement liée à une mécanique d’exploration, et c’est à ce titre que cette source d’incertitude est peut être la plus proche des recherches menées sur l’émergence de la curiosité épistémique. Il peut s’agir du brouillard de guerre dans un jeu de stratégie, d’un nouveau décor, ou encore des cartes dans la main d’un autre joueur. Cette incertitude implique, à terme, la mise en place par le joueur d’une stratégie d’exploration visant à combler l’écart d’information. Costikyan note cependant que certains joueurs peuvent considérer l’absence d’informations comme une manière de déséquilibrer l’expérience de jeu.

Ces sources de contingence et d’incertitude peuvent permettre de manipuler le niveau d’information que le joueur a d’une situation donnée. Multiplier les sources d’incertitude permettrait, en outre, d’apporter une plus grande impression de variabilité. Si rejouer un même niveau tend à réduire l’incertitude du joueur, en varier certaines caractéristiques a pour effet de conserver un niveau d’incertitude adéquat.

A terme, varier et multiplier les sources d’incertitude pourrait tendre à développer la curiosité épistémique du joueur. Néanmoins, comme le précise Costikyan, la perception de certaines sources d’incertitudes peut être erronée, voire même biaisée. Des études sur le jugement humain ont montré que la perception du joueur de l’incertitude peut mener à une évaluation biaisée de ses chances de succès [25, 62, 28]. Dans certains cas même, l’utilisation de systèmes d’ajustement automatique de la difficulté peuvent déformer cette perception, se traduisant par une importante sur-estimation du joueur de ses probabilités de réussite [19]. Le rôle des feedback est, ici aussi, très important pour leur permettre de réévaluer leur jugement. L’utilisation de feedback est par ailleurs centrale aux stratégies de débiaisement, et en particulier pour limiter les effets du comportement d’excès de confiance [61, 22].

L’écart d’information dans un jeu est donc particulièrement sensible à la perception du joueur, impliquant que le niveau d’incertitude doit être équilibré pour produire une motivation suffisante chez le joueur, et non un ennui ou une frustration. Des feedback constants doivent être aussi utilisés pour rééquilibrer l’écart, et donc permettre de réévaluer une perception potentiellement biaisée. La manière dont le joueur va mettre en

place une stratégie d'exploration en vue de récupérer des informations est guidée par cette perception, ou a minima un ressenti sur la situation elle-même. Les mécanismes relatifs à la curiosité épistémique ont été étudiés en ce sens, et peuvent permettre de mieux décrire les spécificités de l'émergence d'une telle curiosité dans les jeux.

- L'incertitude est considéré comme une caractéristique fondamentale à l'expérience de jeu, centrale dans la prise de décision du joueur et du plaisir de jeu qui en découle.
- Il existe de nombreuses sources d'incertitude, dont il faudrait vérifier l'influence sur la curiosité épistémique. Le caractère aléatoire d'une situation de jeu, et les informations cachées semblent cependant être les sources les plus proches de celles étudiées dans les recherches en psychologie cognitive sur la curiosité.
- L'écart d'information pourrait ainsi être manipulé par différentes sources d'incertitudes, et le choix des feedback adressés au joueur.
- La gestion des sources d'incertitude implique ainsi le renouvellement d'une situation de jeu, et donc peut avoir une influence sur le sentiment de variabilité, ou de nouveauté.

3.3 Le modèle I/D et types de joueurs

En prolongement des travaux de Loewenstein, Litman et al. cherchent aussi à expliciter les mécanismes sous-jacents à l'expression de la curiosité, et présentent un nouveau modèle de la curiosité épistémique [40]. Les auteurs prennent comme point de départ l'étude et la définition de la curiosité via la taxonomie de Berlyne (voir sections 2.2 et 2.3), et des recherches qui en découleront, ainsi que la théorie de l'écart d'information de Loewenstein (voir section 3.1). Jusqu'ici, la curiosité était décrite dans la littérature selon deux grandes approches [40, 46, 12] :

- L'approche CDT (pour *Curiosity-Drive Theory*) qui spécifie que le déclenchement de l'état curiosité est du à une volonté de vouloir réduire une incertitude relative à une situation nouvelle, complexe ou simplement inhabituelle. Réduire cette incertitude revient à mettre en place une stratégie d'exploration de l'environnement en vue de récupérer les informations utiles. Plus l'incertitude est réduite, moins l'état de curiosité est nécessaire. L'émergence de la curiosité serait donc du à un sentiment d'inconfort relatif à l'impression d'incertitude.
- L'approche OAT (pour *Optimal Arousal Theory*) explique que l'état de curiosité apparaît lorsque une personne cherche à développer son attention, attention qui serait elle suscitée par de multiples stimuli visuels et sonores. Cela implique que la personne soit ainsi au préalable dans un état d'ennui, voire de lassitude, et veut explorer son environnement pour modifier cet état. Une fois que les informations nouvelles ont été récupérée, la personne revient dès lors à un état d'ennui.

Litman et al. apportent deux réserves à ces approches, relatives à la description des émotions à l'origine de l'état de curiosité, à savoir l'inconfort pour l'approche CDT et l'ennui pour l'approche OAT. La mise en place de stratégies d'exploration peut se faire a priori de la présentation de situations nouvelles ou inhabituelles. La motivation de la personne à mettre en place de telles stratégies n'est donc pas uniquement lié à un inconfort relatif à l'évaluation d'une situation. De plus, il est étonnant que si des personnes cherchent à obtenir des informations nouvelles, et donc veulent apprendre de leur environnement, c'est pour ensuite revenir à l'état d'ennui préalable [40, page 150].

Ils proposent ainsi de simplifier et synthétiser ces approches autour du modèle I/D, dans lequel ils précisent que la curiosité peut être : 1) à la fois induite et recherchée volontairement par une personne générant ainsi un sentiment positif, et, 2) qu'elle permet de réduire un sentiment plus désagréable lié au manque d'information. Ils décrivent deux types de curiosité épistémique [40] :

- **Curiosité épistémique de type I** (pour *interest*), stimulée lorsque la recherche d'information induit un sentiment positif d'intérêt. Ce type de curiosité apparaît dans des contextes où la personne cherche des informations en vue d'en apprendre plus sur la situation.
- **Curiosité épistémique de type D** (pour *deprivation*), stimulée lorsque la recherche d'information tend à réduire un sentiment négatif, désagréable, lié à l'état d'incertitude. La curiosité de type D apparaît dans des contextes où la personne a l'impression qu'il lui manque des informations fondamentales pour la compréhension de la situation.

La curiosité épistémique de type I n'apparaîtrait que lorsque la personne n'a que peu, voire aucune information a priori sur la situation, et doit donc construire son éventail de connaissances par l'exploration. À l'inverse, la curiosité épistémique de type D, impliquant le manque d'une information cruciale à la compréhension de la situation, la personne chercherait à compléter un éventail de connaissances déjà existant [42]. Chaque type de curiosité épistémique est alors différemment influencée par l'écart d'information :

Loewenstein suggested that curiosity may intensify when we feel closer to completing a knowledge gap because of learning processes involved in goal attainment; that is motivation tends to increase in strength as we approach satisfaction of an appetite. Possibly, similar mechanisms underlie self-directed knowledge attainment as well. Another possibility is that the reward-value of new information depends in part on its ability to be incorporated into existing knowledge-sets. ([42], page 2)

Huck et al. s'intéressent de leur côté à l'émergence d'une curiosité épistémique de type I et D dans le cadre de jeux vidéo. Leur objectif est d'étudier le rôle de la curiosité comme stimulant de l'apprentissage dans le cas où il y a variabilité au cours de la session de jeu. Plus spécifiquement, ils veulent vérifier si la curiosité prédispose l'ex-

ploration et la recherche d'informations lors de l'introduction de nouveaux éléments de jeu [30]. Les auteurs cherchent à vérifier l'émergence de ce comportement en fonction des deux types de curiosité épistémique détaillées en amont : curiosité de type I, pour une curiosité générée par un intérêt ; et curiosité de type D, pour une curiosité générée par une frustration liée à un manque d'information.

Leur expérimentation se base sur le jeu de tir multijoueurs *Unreal Tournament* (1999), pour un temps de jeu d'environ 4 heures. Les participants doivent réaliser 28 essais d'un match de 4 minutes, où l'objectif est de réaliser le plus score. Au quatorzième essai, le jeu change considérablement, sans que l'article ne précise en quoi. Les modifications peuvent pourtant être particulièrement importante, comme l'introduction d'une nouvelle carte de jeu, ou encore l'ajout de personnages non joueurs qui peuvent modifier l'équilibre de la difficulté. Les auteurs récupèrent la performance de chaque joueur et la compare avant et après modification du jeu. Cette performance est analysée en utilisant le *performance index* du jeu, qui récupère notamment le score du joueur, et ils y ajoutent aussi le temps que le joueur met pour revenir au niveau de sa performance précédente. La curiosité du joueur est évaluée selon les échelles de Litman [41], une série de questions posée aux participants après avant et après la modification du jeu. A titre d'exemple, ces questions de l'ordre de : « *I enjoy trying new things when playing videogames.* » ou « *I spend hours on challenging videogames because I can't rest until I have figured them out* ».)

Les résultats ont montré que les participants présentant une plus forte curiosité de type I ont pu maintenir leur performance, soit revenir à un niveau de performance avant les modifications du jeu, sans pour autant que leur apprentissage ne soit plus rapide. Leur capacité d'adaptation face à une partie du jeu au contenu modifié n'a pas été influencé par ce type de curiosité. Les effets sont à l'inverse bien moindres pour les joueurs présentant une curiosité de type D. Les auteurs expliquent ce résultat par la définition même de la curiosité de type D, qui implique plus un sentiment de frustration, et non de plaisir relatif à la recherche d'information.

Des joueurs présentant une curiosité épistémique de type D seraient donc moins enclin à explorer et chercher des informations nouvelles dans le cas où le niveau de jeu serait modifié. Il serait intéressant de croiser ces résultats avec les taxonomies de profils de joueurs, comme celle de Bartle [7], Bateman & Lowenhaupt [9], ou encore Ferro et al. [24], pour vérifier si certains de ces profils tendent à développer un type de curiosité épistémique plutôt qu'un autre. Cela permettrait de mieux associer le modèle de la curiosité des joueurs à des profils de joueurs et des situations de jeu, et de se prévenir de l'influence de préférences personnelles lors de l'analyse du comportement des joueurs dans le cadre d'expérimentations et de playtests.

- Litman et al. décrivent deux types de curiosité épistémique, chaque type étant associé à un ressenti, un sentiment relatif à la recherche d'information :
 1. Curiosité épistémique de type I, pour *interest*, stimulée lorsque la recherche d'information induit un sentiment positif d'intérêt. Elle n'apparaît que lorsqu'un individu n'a que peu d'informations, voire aucune, et doit construire son socle de connaissances.
 2. Curiosité épistémique de type D, pour *deprivation*, stimulée lorsque la recherche d'information tend à réduire un sentiment négatif, d'inconfort, lié à l'état d'incertitude. La curiosité de type D apparaît dans des contextes où l'individu a l'impression qu'il lui manque des informations fondamentales pour la compréhension de la situation. Il chercherait alors à compléter ses connaissances.
- Selon Huck et al., le type de curiosité épistémique peut avoir une influence sur la performance de joueurs de *FPS* ; ceux présentant une plus forte curiosité de type I ont pu maintenir leur performance, comparativement à ceux présentant un type D, sans pour autant que leur apprentissage ne soit plus rapide.

4 Influences de la nouveauté et la complexité sur la curiosité

Ce document cherche à questionner la notion de variabilité, et en particulier l'attrait de la nouveauté chez le joueur, en vue de proposer des pistes de conception visant à améliorer sa motivation et son engagement. La curiosité a ainsi été décrite en ce sens, analysée dans sa variété tout en considérant aussi les limites propres à sa manipulation.

Les parties précédentes ont été dédiées à la présentation du concept de curiosité, ses multiples formes et définitions, et le rôle de l'incertitude dans le déclenchement de la curiosité. Les liens avec la conception de situations de jeu visant à favoriser l'émergence de la curiosité ont été aussi introduits : au travers de stimuli sensoriels d'une part ; par la gestion des sources d'incertitude pour manipuler la quantité d'information que le joueur a à sa disposition pour piquer sa curiosité d'autre part.

Cette partie va maintenant se focaliser sur l'influence de la nouveauté et de la complexité sur l'émergence de l'état de curiosité, et la mise en place de stratégies d'exploration qui en découlent.

4.1 Nouveauté et incongruité

Dans le cadre de ses études sur la curiosité, Berlyne a cherché à caractériser la notion de nouveauté, notion centrale à l'émergence de l'état de curiosité. Il en décrit trois

aspect : une **nouveauté complète**, pour une expérience qui n'a jamais été en mémoire, une **nouveauté à court terme** (*short-term novelty*), pour une expérience analogue qui a été vécue dans les dernières minutes ; et une **nouveauté à long terme** (*long-term novelty*), pour une expérience analogue vécue il y a plusieurs jours déjà. Il distingue aussi la **nouveauté absolue**, pour laquelle l'évaluation de la qualité de l'expérience n'a pas été perçue, de la **nouveauté relative**, dont la qualité de l'expérience est familière. Cette distinction est utile pour qualifier l'expérience de la nouveauté chez l'enfant, mais est plus problématique lorsqu'il s'agit de la qualifier chez un adulte, qui analyse ses expériences par rapport aux antérieures, risquant d'en biaiser leurs interprétations. C'est par ailleurs l'une des difficultés de la catégorisation des expériences nouvelles selon Berlyne, précisant que les humains ont tendance à évaluer le caractère nouveau selon un éventail spécifiques d'expériences passées, des modèles, et non pour l'expérience en elle-même [11]. Dans le cas de tâches complexes du quotidien, il paraît délicat d'arriver à les classer selon les critères énoncés en amont.

Berlyne propose ainsi de mesurer les degrés de nouveauté d'une situation selon trois critères, mesure basée sur la reconnaissance de modèles [11, page 22] :

1. Récurrence du modèle : à quelle fréquence ce nouveau modèle est-il similaire à d'autres qui ont été jugés utiles pour analyser la situation rencontrée ?
2. Contiguïté des modèles : ont-ils été expérimentés récemment ?
3. Ressemblance des modèles : à quel point sont-ils similaires ?

Poursuivant ces recherches, Wentworth et al. ont, quant à eux, évalué la hiérarchisation de la perception de la nouveauté, notamment au travers de sa distinction avec la variété [72]. L'attrait de la nouveauté ne se limite pas à une simple variation d'expérience, et le caractère varié apparaît comme bien moins recherchée par les individus. À l'inverse, plus une expérience va présenter un caractère incertain, plus elle va être désirée par les individus.

Variety, defined as simple concurrent variation in experience, was placed at the lowest level. Novelty, defined as variation in current experience compared to the past, was placed at a higher level because it compels the individual to integrate experience over time. Uncertainty, defined as simultaneous anticipation of multiple alternatives, was placed at the highest level because it requires continued engagement in order for the uncertainty to be reduced. ([72], page 286)

Cette catégorisation de Wentworth et Witryol peut être délicate à appréhender dans le sens où elle compare trois notions qui ont chacune une définition complexe dans l'étude du jugement humain. Néanmoins, cela permet de souligner l'importance de la prédiction dans l'évaluation de l'intérêt que peut présenter une situation à une personne. Plus la situation permet à l'individu de pouvoir se projeter, plus cette situation est jugée comme désirable.

Berlyne note toutefois qu'il est difficile d'évaluer précisément le degrés de similitude permettant de qualifier un modèle de nouveau, voire même de faire abstraction

des expériences passées de l'individu, qui vont et ont modifié sa perception de la nouveauté. Pour éviter tout biais de mémoire qui pourrait conduire l'individu à généraliser abusivement des souvenirs imprécis sur une situation, Berlyne propose de se rattacher à l'évaluation du conflit que la situation génère. Une situation perçue comme nouvelle génère une incertitude qui va être à la source d'un conflit, conflit qui lui même va susciter la curiosité de l'individu [11].

Berlyne note ensuite trois variables liées à la réception de la nouveauté, chacune d'entre elle impliquant des degrés divers d'incertitude : **le changement** et l'attente du changement, comme par exemple le changement de couleur d'un feu de signalisation ; **la surprise**, qui correspond à une transgression des attentes qu'une personne a pu évaluer d'une situation ; et **l'incongruité**, qui correspond aussi à une transgression des attentes mais implique une émotion négative. La différence avec la surprise reste cependant très ténue et Berlyne présente, à ce titre, l'incongruité comme un cas à part de la surprise.

Incongruity, on the other hand, exists when a stimulus induces an expectation which turns out to be disappointed by the accompanying stimuli. The expectations involved will thus be due to synchronous predictive redintegration. ([11], pages 24-25)

L'incongruité cependant, plus que la surprise, est considérée dans la littérature comme l'un des instigateurs le plus important de la curiosité. Par définition, le caractère incongru d'une situation vient questionner les croyances de la personne qui l'évalue, générant ainsi un conflit, conflit qui à son tour va nourrir l'exploration, comme présenté en section 2.3. La situation incongrue n'apparaît plus comme cohérente avec le reste du monde, stimulant alors la personne à chercher une explication [71]. De plus, une situation jugée comme incongrue aurait pour effet d'augmenter l'incertitude de la personne sur son déroulement et/ou son fonctionnement, faisant de l'incongruité un facteur indirect mais particulièrement fort de la curiosité [11].

Dés lors, il existe un niveau optimal d'incongruité d'une situation pour que l'état de curiosité soit maximal [46, 55]. Berlyne, plus globalement, préfère parler d'un niveau optimal de nouveauté, dont l'incongruité ferait parti. L'état de curiosité serait maximal pour un niveau de nouveauté intermédiaire, à mi-chemin entre une situation familière et entièrement nouvelle [11, 72]. Ce niveau optimal dépendrait, là aussi, des préférences personnelles de chacun, à l'exception évidente des individus faisant preuve de néophobie.

For each individual, there should be an optimal level of novelty where curiosity and exploration are maximal. Levels of novelty below this amount would be too low to foster curiosity, and higher levels of novelty would be too high, overwhelming the individual and precluding exploration. ([72], page 283)

La question d'une optimalité de la nouveauté se trouve, au travers de la notion d'incertitude, discutée par la théorie de l'écart d'information, présentée en section 3. La quantité d'information qu'un individu a lors de l'évaluation d'une situation donnée correspond à un niveau d'incertitude quant au fonctionnement de cette situation. Ce niveau d'information doit être suffisant pour susciter la curiosité, mais ne doit pas être trop important pour générer une trop forte incertitude, conduisant à de l'anxiété, qui va risquer de freiner toute stratégie d'exploration.

Considérer l'incongruité permet de préciser qu'en plus du niveau d'information, et l'incertitude associée, le contenu même de l'information, et de la dissonance cognitive qu'il peut générer, est aussi moteur de l'émergence de l'état de curiosité.

La nouveauté est très relative lors de l'expérience d'un jeu. Tout d'abord parce que le jeu est conçu pour que le joueur apprenne très vite à le manipuler pour en tirer un plaisir quasi-immédiat. Ensuite parce que les jeux actuels reposent sur des codes, règles et même expériences que le joueur a déjà rencontrés dans d'autres jeux. La perception d'une situation de jeu comme nouvelle est ainsi biaisée. Les éléments de cadrage de Berlyne peuvent néanmoins apporter un premier éclairage sur la qualification d'éléments nouveaux, notamment dans la récurrence des éléments rencontrés par le joueur, leur contiguïté et ressemblance.

- Berlyne décrit la nouveauté comme l'un des facteurs les plus importants de la curiosité. Ce facteur peut être défini au travers de la reconnaissance de modèles :
 1. Récurrence du modèle : à quelle fréquence ce nouveau modèle est-il similaire à d'autres qui ont été jugés utiles pour analyser la situation rencontrée ?
 2. Contiguïté des modèles : ont-ils été expérimentés récemment ?
 3. Ressemblance des modèles : à quel point sont-ils similaires ?
- La perception de la nouveauté et son influence sur la curiosité dépend donc de l'incertitude qui entoure la reconnaissance et le fonctionnement d'une situation. Cet incertitude va générer un conflit, une dissonance cognitive qui va susciter la curiosité de l'individu.
- Trois variables conditionnent la réception de la nouveauté :
 1. le changement et l'attente du changement, comme par exemple le changement de couleur d'un feu de signalisation ;
 2. la surprise, qui correspond à une transgression des attentes qu'une personne a pu évaluer d'une situation ;
 3. l'incongruité, qui correspond aussi à une transgression des attentes mais implique une émotion négative.
- Un niveau optimal de nouveauté assure un état de curiosité maximal, dépendant des préférences personnelles, et ne touchant pas les néophobes.

4.2 Complexité et difficulté

Avec l'incongruité, la complexité d'une tâche est régulièrement présentée comme l'un des stimuli les plus importants de la curiosité, l'évaluation de la complexité faisant par ailleurs partie intégrante de la perception de la nouveauté d'une situation [71].

Pour autant, la complexité reste le terme le moins bien défini dans la littérature, et sa circonscription varie d'un auteur à autre. Berlyne qualifiait à ce titre la complexité comme « le plus intangible des concepts » utilisés pour délimiter la curiosité [11, 12]. Sa définition est régulièrement associée à des exemples, et non à un formalisme plus général.

Berlyne présente la complexité au travers de tâches basées sur la reconnaissance de formes géométriques. Plus une forme présente d'éléments, ou encore de dimensions, plus elle est décrite comme complexe : « One might say roughly that [complexity] refers to the amount of variety or diversity in a stimulus pattern » ([11], page 54). Ce type de tâche est régulièrement utilisé dans la littérature pour mesurer l'influence de la complexité sur la curiosité [71, 72]. Un exemple est donné en figure 6.

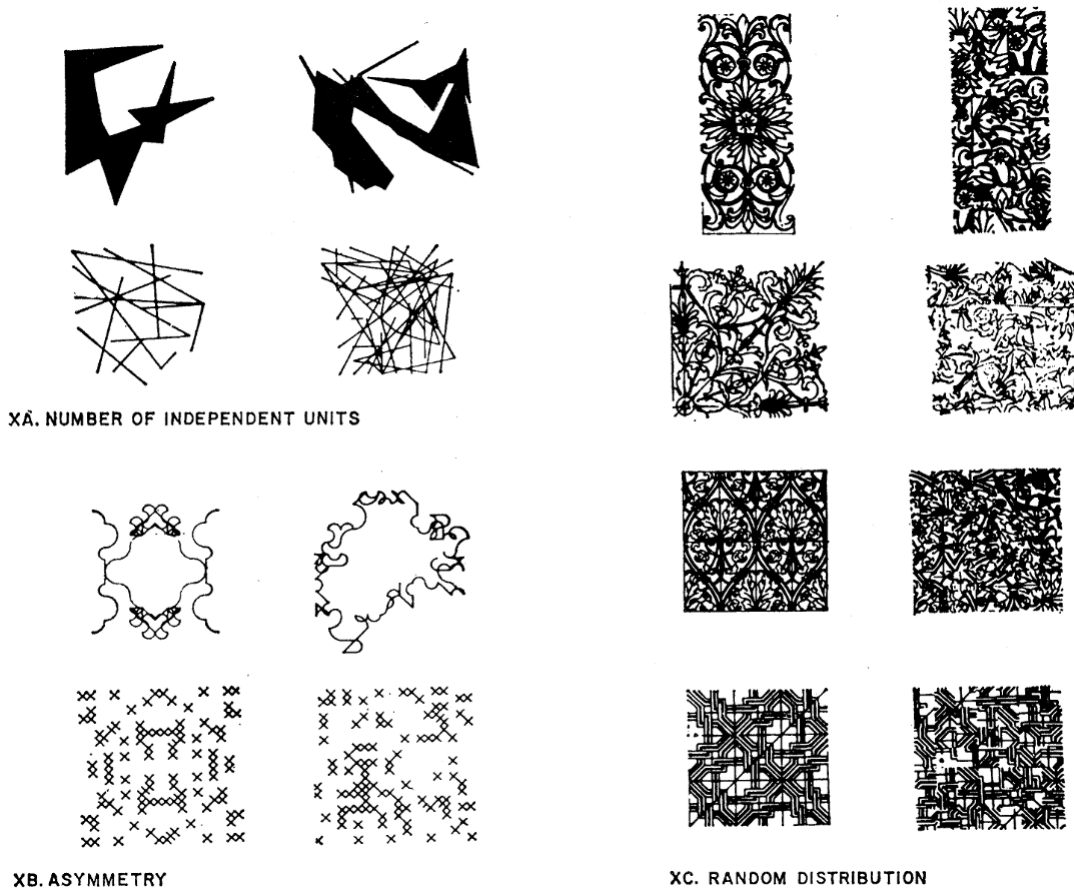


Figure 6 : *Exemples de formes géométriques complexes utilisées dans les études sur la mesure de la complexité et son influence sur la curiosité. Figure tirée de [12].*

Dans un recueil dédié à l'étude des stratégies d'exploration relatives à l'état de curiosité, Henderson et al. discutent notamment de la notion de complexité et de son rapport avec la nouveauté, au travers de perspectives technologiques. Ils prennent en particulier l'exemple d'un système informatique, un jeu de labyrinthe [29] :

The complexity of the computer labyrinth results from complex hardware and software configurations interacting with the task demands and input behavior of the user. The paths through the labyrinth may be very simple, predictable, and safe for routine tasks as long as we perform with precise, error-free input behavior and use our well-known, standard configurations. But if the task is new, if the system configuration is changed only a little bit (by a colleague using our computer), or if we vary our input behavior (pressing one wrong key at the wrong moment), the complexity of the whole environment may increase dramatically. ([29], page 293)

Quatre critères de complexité de la tâche sont ainsi définis, chacun se rapportant à la complexité d'éléments indépendants :

1. La tâche en elle-même, ici la complexité du labyrinthe.
2. La complexité des interactions avec l'outil.
3. La complexité relative à l'utilisation des périphériques d'entrée.
4. La configuration hardware et software.

Il faut noter que Henderson et al. ne décrivent pas cet outil comme un jeu, et que cette dénomination nous est propre. Pour autant, il est aisé de rattacher ces critères à la conception de jeu :

1. La complexité du labyrinthe décrit la complexité relative à la conception du niveau, se référant aux méthodologies de level design et à la création du parcours de jeu.
2. La complexité des interactions avec l'outil concerne les interactions joueur/jeu, qui s'opèrent au travers des questions d'ergonomie et d'interface. A de rares exceptions, la conception de l'interface dans les jeux vidéo cherche à limiter autant que possible toute complexité ; l'interface doit se faire discrète, accessible, lisible et utile, pour que le joueur puisse rapidement s'immerger dans l'expérience de jeu.
3. La complexité relative aux périphériques d'entrée s'observe via l'utilisation de périphériques de jeu (joypad, manette, joystick, combo clavier/souris, etc.) Ces outils répondent cependant à des contraintes de simplicité d'utilisation et d'efficacité. La complexité d'utilisation de manettes ou joystick n'est ainsi que très peu recherchée par les concepteurs de jeux vidéo grand public.
4. La complexité de la configuration hardware et software est finalement la moins voulu lors de la conception de jeu, puisque les concepteurs veillent à ce que la qualité de l'expérience de jeu soit la même pour différentes configurations hardware et software. L'émergence du marché des consoles, au profit de l'ordinateur personnel, s'est à ce titre réalisé sur la promesse d'une expérience similaire et partagée entre tous les joueurs.

Henderson et al. décrivent finalement peu la complexité même du parcours du labyrinthe qui, dans le cas de cette étude focalisée sur le level design de *FPS*, est le type de complexité avec lequel il semble possible de manipuler la curiosité du joueur. Comme Berlyne, Henderson et al. limitent cette complexité par la forme géométrique du parcours, via le nombre d'embranchements possibles, sans intégrer l'effort que la personne doit fournir pour traverser ce parcours. Un labyrinthe peut présenter de multiples embranchements, mais se révéler être simple à traverser car la solution est peu élaborée, comme un chemin en ligne droite vers la sortie.

Les travaux de Michael S. McClendon, sur l'étude et la conception de labyrinthes, précisent que la complexité globale d'un labyrinthe dépend à la fois de la complexité du parcours, le chemin vers la sortie, et l'ensemble des branches du labyrinthe [52]. Un

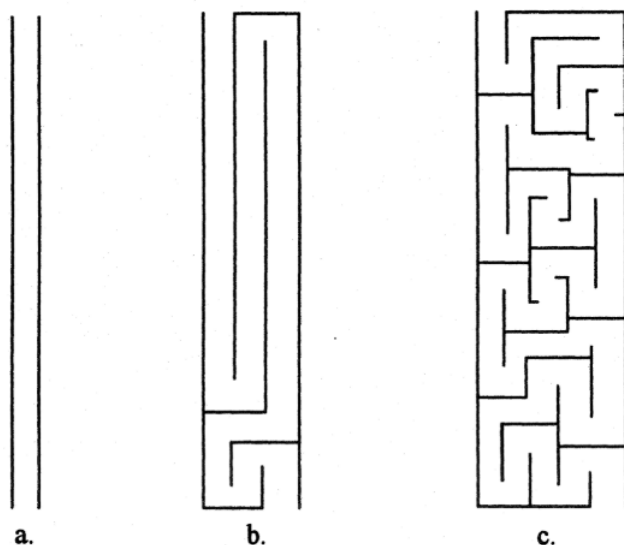


Figure 7 : Exemples de niveaux de complexité dans la forme d'un labyrinthe. Figure tirée de [52].

exemple est donné en figure 7. McClendon différencie ainsi la complexité de la forme labyrinthe de la complexité de sa solution, le parcours du labyrinthe. Si cette solution est simple, le labyrinthe n'est pas jugé comme difficile à parcourir. Un autre exemple est donné en figure 8.

Plus récemment, des intelligences artificielles utilisées pour évaluer la complexité des labyrinthes, simulent leur faisabilité au travers de l'exploration du parcours par un agent virtuel [13]. Pour un labyrinthe, il faut ainsi distinguer la complexité de la forme, à la difficulté à le parcourir, et leur influence respective sur l'émergence de la curiosité.

Dans le cadre plus étendu du jeu vidéo, la différence entre complexité et difficulté est aussi approchée par la perception que le joueur a de la tâche à résoudre, comme le souligne Guillaume Levieux [39, 5] :

Dans son emploi, la complexité peut donc directement qualifier un objet, une structure complexe par exemple, puisqu'elle décrit la difficulté qu'on a à comprendre son fonctionnement. Par contre, la notion de difficulté suppose qu'on précise une activité, comme pour la difficulté de porter une charge lourde par exemple. [...] On peut ainsi dire que dans un jeu vidéo, un challenge d'une certaine difficulté demande une certaine quantité d'attention pour être résolue, et cette quantité d'attention dépend directement de la complexité du problème. ([39], page 24)

La différenciation entre complexité et difficulté a notamment été illustrée dans la suite de ces recherches sur la mesure de la difficulté d'un jeu de taquin face à un jeu de réflexe [20]. Le premier est un jeu de difficulté logique, mesurée par l'effort indispensable au joueur pour réaliser une induction ou une déduction à partir des informations qu'il

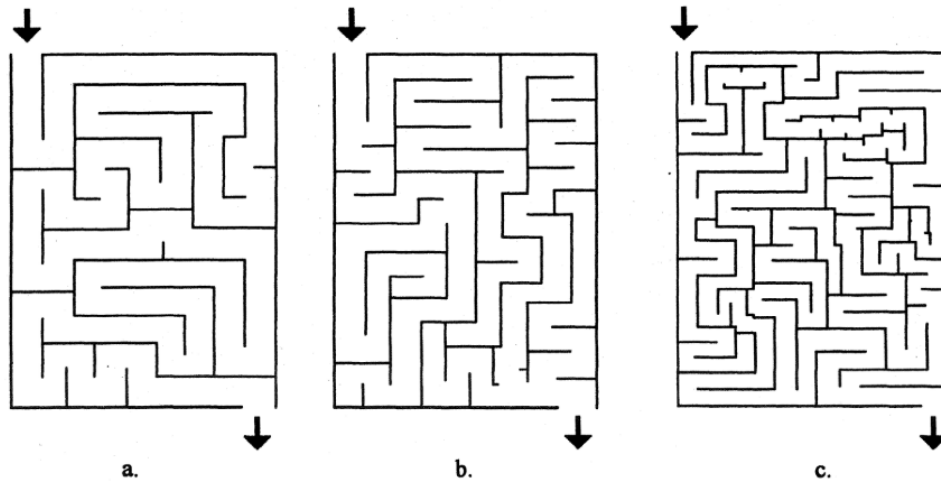


Figure 8 : *Trois exemples de labyrinthe de différentes difficultés. Figure tirée de [52].*

a en sa possession, où le joueur doit replacer une grille mélangée aléatoirement dans son ordre numérique. Le second est un jeu de difficulté motrice, qui adresse l'effort physique que le joueur doit exercer pour réaliser une action de jeu, où le joueur doit appuyer sur un bouton lorsqu'un curseur passe sur une cible. Le jeu de réflexe est d'une complexité relativement simple, quel que soit le niveau de difficulté, puisque seule la vitesse du curseur change. A l'inverse, le jeu de taquin voit sa complexité augmenter de pair avec sa difficulté, puisque la procédure de résolution est directement liée au paramètre de difficulté, qui est le nombre de déplacements nécessaire pour réorganiser ladite grille.

Pour ces raisons, l'influence de la difficulté, allant de pair avec la complexité, ne peut donc être ignorée dans l'étude de la curiosité, et en particulier de son impact sur la mise en place d'une stratégie d'exploration. A ce titre, Baranes et al. décrivent des jeux de réflexes, analogues à celui présenté en amont, dans le cadre d'une expérimentation visant à vérifier le lien entre la difficulté d'une tâche et la mise en place d'une stratégie d'exploration [6]. Ils ne cherchent toutefois pas à mesurer la curiosité en elle-même, mais le comportement des joueurs dans leur sélection et exploration de mini-jeux de niveaux de difficulté variée. Le gameplay est analogue à celui décrit plus haut, à savoir une tâche pour laquelle le joueur est invité à appuyer sur une touche du clavier lorsqu'une cible passe sur le curseur. La variable de difficulté étant la vitesse de la cible, la complexité restant, elle, la même tout au long de l'expérimentation. Les joueurs peuvent sélectionner différents niveaux de difficulté pour un jeu, et demander aussi à générer de nouveaux jeux à divers niveaux de difficulté. Les auteurs ont notamment montré que l'exploration des joueurs était motivé par la nouveauté, mesurée par la génération de jeux, et aussi par la difficulté, puisque les joueurs créent leurs propres courbes de difficulté, commençant par des niveaux où leur chances de succès sont élevées pour finir vers des niveaux où leurs chances de succès sont bien plus

faibles.

La mesure de la complexité d'une tâche ne pourrait donc être, a priori, analogue à celle de sa difficulté. Pourtant, toujours dans le même ouvrage, Henderson et al. décrivent une méthode pour estimer la complexité d'une tâche, dans le cadre d'utilisation d'un outil informatique, au travers du nombre d'essais réalisés par l'individu. A terme, il semble possible pour les auteurs d'estimer la complexité de la tâche pour un individu en réalisant une projection basée sur des observations antérieures.

For an individual who is not able to solve the problem within a reasonable number of steps (or gives up), the complexity is extremely high. If we confront a computer expert with the same state, she/he will be able to solve the task with a lower (maybe the lowest possible) number of steps. We also may change the configuration or simulate a difficult error situation (without telling the user) and ask the person to solve the resulting problem. In doing so, we may simulate and assess individual task complexity changes in special situations. ([29], page 294)

La mesure de la complexité par Henderson et al. consiste à calculer le nombre d'essais pour une tâche. Plus ce nombre est élevé, plus la tâche est jugée comme complexe. Le niveau de compétence de l'individu est aussi pris en compte, puisqu'un expert vient apporter une mesure de base de la complexité de la tâche. Il existe néanmoins une limite à cette approche, puisque une telle mesure ne permet pas de distinguer la complexité de l'effort lié à la réalisation de la tâche. Par exemple, une tâche évaluée comme moyennement complexe peut être réalisée de nombreuses fois par l'individu qui n'a pas la motivation, ou l'envie, nécessaire pour sa réalisation.

De son côté, Levieux et al. déterminent la difficulté objective d'une tâche dans un jeu vidéo sur ces critères analogues, à différencier d'une difficulté perçue qui tient compte, elle, de l'appréciation du joueur. Cette difficulté objective est calculée pour chaque niveau la probabilité d'échouer, considérant le paramètre de difficulté du jeu et les compétences du joueur, en tenant compte des variations de performance d'un joueur à un autre [5, 20]. Si cette mesure n'isole pas non plus un calcul indépendant de la curiosité, elle est néanmoins plus réaliste dans son appréciation la difficulté moyenne d'un challenge, ou d'une tâche, sans avoir à passer par une valeur de base donnée par un expert, dont la sélection pose aussi problème.

Il semble en tout cas assez délicat d'obtenir une mesure de la complexité indépendamment de la difficulté, en particulier dans le cadre d'un jeu vidéo. Comme dans tout environnement supposant un apprentissage, l'effort que doit fournir le joueur est lié à la complexité même de la tâche, et de la perception que le joueur a de cette complexité et donc de l'effort à fournir en réponse.

A ce titre, un autre point d'analogie entre complexité et curiosité réside dans la question de la perception de ces deux caractéristiques, et dans leurs préférences. Plusieurs études ont montré que les liens entre complexité et curiosité répondent à un critère d'optimalité. Comme pour l'incongruité, il existe une complexité intermédiaire,

ni trop faible, ni trop élevée, qui assure un état de curiosité maximal [11, 71, 55]. Ces mêmes résultats s'observent pour l'appréciation de la difficulté d'une tâche dans un jeu vidéo, où les joueurs favorisent des niveaux de difficulté adaptés à leurs compétences [16, 70]. Des systèmes d'ajustement dynamique de la difficulté permettent de proposer pour chacun des joueurs un niveau optimal de difficulté, augmentant considérablement leur motivation [4, 17] et leur appréciation globale de l'expérience de jeu [36, 63].

De plus, il a été montré que la perception de la difficulté d'une tâche dans un jeu diffère grandement de sa difficulté objective, et qu'elle est de plus particulièrement sensible aux systèmes d'ajustement de la difficulté [20, 19]. Il a été observé que les joueurs ont tendance à surestimer leurs chances de succès lorsque la difficulté du jeu s'adapte à leur niveau de compétence. Cet excès de confiance, qui induit un élan de motivation, pourrait aussi apparaître dans l'évaluation de la complexité par le joueur. Comme pour la difficulté, il faut considérer qu'il existerait possiblement une différence entre la complexité objective d'une tâche, et la complexité perçue par le joueur, qui peut être biaisée par le fonctionnement même du jeu. La littérature relative à la curiosité n'en fait, pour le moment, pas état.

La littérature sur l'influence de la complexité sur la curiosité ne semble pas différencier complexité de difficulté, et les résultats de certaines études tendent à montrer que cette influence va dans le même sens. Bien que les l'influence de la complexité et celle de la difficulté sur l'état de curiosité, et la motivation induite par son déclenchement, semblent analogues, il est important dans le cadre d'utilisation de jeux vidéo de bien marquer la différence entre les deux notions.

La difficulté et la complexité dépendent, il a été vu, d'un critère d'optimalité pour que la motivation du joueur soit maximale. Il a aussi été précisé que la perception de la difficulté d'une tâche est biaisée, conduisant le joueur à sous-estimer la difficulté d'une tâche pour les niveaux présentant la difficulté la plus élevée. De nouveau, l'incertitude est l'élément moteur de la curiosité du joueur ; une situation jugée trop complexe, ou trop difficile, va frustrer le joueur et limiter sa capacité d'exploration ; une situation jugée trop simple, ou trop facile, ne présente aucun intérêt et va, là aussi, limiter l'exploration du joueur. Bien qu'il faille encore démontrer l'influence réelle de la difficulté sur la curiosité, indépendamment de la complexité, il semble intéressant de faire l'hypothèse que complexité et difficulté sont deux mécanismes forts de la curiosité. Il est possible de considérer qu'adresser un niveau optimal de difficulté pour un joueur, à savoir un niveau intermédiaire de difficulté, peut conduire à favoriser l'état de curiosité. Les systèmes d'ajustement dynamiques de la difficulté permettront aux concepteurs d'aller en ce sens. Il est néanmoins important de garder en tête que cela peut varier selon la complexité du jeu.

- Avec l'incongruité, la complexité est le deuxième facteur le plus important de la curiosité, et paradoxalement le plus délicat à définir selon Berlyne.
- Dans les tâches de mesure de la complexité en psychologie, la complexité est circonscrite au nombre d'éléments d'une forme géométrique. Par exemple, dans un labyrinthe, il peut s'agir de la complexité de sa forme et de son parcours.
- Comme l'incongruité, un niveau intermédiaire de complexité assure un état de curiosité maximal.
- Les auteurs ne différencient pas la complexité de la difficulté, et n'adressent pas l'influence de la difficulté sur la curiosité.
- Pour autant, un niveau intermédiaire de difficulté favorise la mise en place d'une stratégie d'exploration plus efficace. Cette stratégie pouvant être motivée par un état de curiosité.
- La perception de la complexité et de la difficulté diffèrent de la complexité et de la difficulté réelle d'une tâche.
- Dans le cas de la difficulté, un excès de confiance s'observe pour les niveaux de difficulté les plus élevés, lorsque la difficulté est adaptée.

5 Applications en intelligence artificielle

Les liens entre les stimuli de la curiosité et les éléments de conception de jeu ont été présentés et discutés, qu'il s'agisse de stimuli sensoriels, de la gestion de l'incertitude, et de l'équilibrage de la nouveauté et la difficulté, dans les sections 2 et 3.

La partie 4 a permis de détailler l'influence de la nouveauté d'une tâche et sa complexité sur l'émergence de l'état de curiosité. Plus globalement, il a été montré jusqu'ici dans ce document comment la curiosité peut être à l'origine d'un élan de motivation qui va pousser l'individu à mettre en place une stratégie d'exploration. Cette exploration qui vise à obtenir plus d'information sur son environnement va aussi nourrir à son tour la curiosité de l'individu, au travers de la découverte d'éléments nouveaux, incongrus, surprenants, etc.

Une application des recherches concernant l'influence de l'état de la curiosité sur la mise en place de stratégies d'exploration réside dans les études sur les comportements d'intelligence artificielles en situations d'apprentissage. Ces recherches visent à améliorer l'efficacité d'agents virtuels autonomes dans leur capacité à pouvoir apprendre de l'environnement, en vue de le parcourir de manière optimale. Cette partie est dédiée à la présentation de telles études, et en particulier de travaux se focalisant sur la simulation de l'influence de l'incongruité et de la nouveauté sur la motivation des agents.

5.1 Apprentissage par renforcement et jeux vidéo

Un des procédés utilisés pour améliorer l'entraînement automatisé d'agents virtuel consiste à simuler l'état de curiosité comme élément de motivation intrinsèque pour des intelligences artificielles, dans le cas d'apprentissage par renforcement [56]. L'apprentissage par renforcement est une méthode de l'apprentissage automatique qui stipule que l'agent apprend de lui-même, par ses erreurs, pour affiner sa prise de décision. L'apprentissage par renforcement permet ainsi la réalisation de tâches complexes et incertaines : lorsque l'agent n'a pas d'information sur le choix à faire, et qu'il ne dispose d'aucun retour de la part d'une autorité externe sur la qualité du choix, il doit explorer les possibilités pour obtenir une évaluation a posteriori de la qualité de ses décisions. Cette évaluation se fait au travers d'une récompense, terminologie inspirée par les théories comportementales béhavioristes, qui se traduit par un renforcement positif ou négatif selon les résultats de la tâche obtenus par l'agent. Ainsi, après de multiples tentatives, l'agent vient à tester de lui-même plusieurs stratégies, et dessine à terme une solution optimale pour le problème qui lui est présenté [65].

L'apprentissage par renforcement est une méthode couramment utilisée dans le domaine de la robotique, et ce pour différentes finalités : santé, militaire, automobile, etc. Le jeu vidéo est quant à lui un outil privilégié pour entraîner et vérifier l'efficacité des algorithmes dont l'exploration est motivée par un système de récompenses adressé par l'agent lui-même, et non uniquement l'environnement. De part la nature de l'expérience de jeu, incertaine et contrôlée, de la complexité de la prise de décision qui en découle, et des caractéristiques des environnements virtuels, entraîner des intelligences artificielles à compléter par elles-mêmes des niveaux de jeu constitue un exercice pertinent pour vérifier l'efficacité des algorithmes.

Du point de vue de la conception des jeux, les techniques d'apprentissage par renforcement sont aussi utiles pour assister la production, et ce à différents niveaux [73] : développer et améliorer les algorithmes de génération de niveaux, qui apprennent des résultats des précédentes générations ; modéliser le comportement des joueurs, puis optimiser le comportement des agents chargés de cette simulation, permettant d'améliorer considérablement le coût des phases de *playtest* dans la chaîne de production d'un jeu, vidéo ou de plateau [53].

Dans la section suivante, nous allons présenter deux approches récentes de simulation de l'état de curiosité dans des agents autonomes, l'un focalisé sur le mécanisme de surprise, l'autre sur celui de nouveauté. Ces approches donnent deux exemples d'une application des théories en psychologie cognitive concernant l'émergence de l'état de curiosité, et une possible simulation des mécanismes associés à l'échelle d'intelligences artificielles, en vue d'améliorer l'efficacité de l'exploration chez des agents virtuels.

- Pour améliorer l’entraînement automatisé d’agents virtuels, un état de curiosité est simulé pour augmenter leur motivation à explorer un espace.
- L’apprentissage par renforcement est une technique de l’entraînement automatisé, où l’agent apprend de lui-même, par essais-erreurs. Pour améliorer sa performance, une récompense est associée à son exploration.
- Le jeu vidéo est privilégié pour entraîner et vérifier l’efficacité d’intelligences artificielles dans le cadre d’un apprentissage par renforcement.
- L’apprentissage par renforcement est aussi utilisé pour l’entraînement d’intelligences artificielles utiles pour le développements de jeux vidéo, comme pour la génération de niveaux ou encore l’évaluation de la qualité de l’expérience de jeu.

5.2 Approche par erreur de prédiction : Intrinsic Curiosity Module

Les recherches en intelligence artificielle sur l’apprentissage par renforcement se sont dernièrement focalisée sur la modélisation d’agents motivés de manière intrinsèque suite à l’émergence d’un état de curiosité. L’objectif est d’améliorer l’efficacité des algorithmes dans l’exploration d’environnements, sans autre objectif et récompense que la découverte elle-même.

Pathak et al. présentent un modèle d’agent dont la stratégie d’exploration est « orientée » par sa curiosité, et non par une série d’action aléatoire [59]. Cette curiosité est décrite comme une récompense intrinsèque à l’exploration, basée sur des prédictions de l’agent sur le monde virtuel. A partir des connaissances que l’agent a de l’environnement, il doit prédire son fonctionnement et adopter la stratégie optimale. Dans un environnement nouveau, encore inexploré par un agent inexpérimenté, ses prédictions vont s’avérer rapidement fausses. Cette erreur de prédiction est la récompense de l’apprentissage : plus l’erreur de prédiction est importante, plus l’agent est récompensé. Il va ainsi poursuivre son exploration, observer des états nouveaux du monde, dont la découverte va entraîner de nouvelles erreurs de prédiction. Sans la nommer, les auteurs décrivent au travers de l’erreur de prédiction le mécanisme de surprise, voire d’incongruité, soit une source centrale de la motivation intrinsèque [56], décrit dans la section 4.1. Cette récompense intrinsèque est calculée par un module dédié, *Intrinsic Curiosity Module* ou ICM, à laquelle s’ajoute récompense dite extrinsèque, qui est d’atteindre la sortie de l’environnement.

L’erreur de prédiction est calculée sur la base de la description des observations de l’environnement par l’agent. Pour limiter le coût de ces observations en mémoire et en calcul, Pathak et al. évitent une comparaison pixel par pixel et proposent de simplifier la représentation de l’environnement en trois formes distinctes [59, page 3] :

1. Toutes choses qui peuvent être contrôlé par l’agent ;
2. Toutes choses que l’agent ne peut contrôler mais qui peuvent l’affecter ;
3. Toutes choses que l’agent ne peut contrôler et qui ne peuvent l’affecter.

L’environnement à analyser doit ainsi, selon eux, se limiter aux formes (1) et (2), la dernière, ne concernant pas directement l’agent, peut être que considérée comme du bruit lors de l’analyse.

Les auteurs testent les performances de l’ICM au travers de deux jeux, *VizDoom*, une version open-source du jeu de tir *Doom* dédiée à l’entraînement des intelligences artificielles², et *Super Mario Bros.*, et selon trois modalités :

1. Une pour laquelle la récompense extrinsèque est associée au but de la partie, à savoir explorer le niveau pour en rejoindre la fin.
2. Une autre où il n’y a pas de récompense extrinsèque associée à l’exploration.
3. Une dernière visant à évaluer l’efficacité de l’ICM indépendamment de la phase d’entraînement préalable à chaque modalité. Pour cela, l’entraînement ne comporte aucune récompense liée à l’exploration (intrinsèque, extrinsèque), et chaque scénario est considéré comme nouveau (une nouvelle carte avec de nouvelles textures dans *VizDoom*, un autre niveau dans *Super Mario Bros.*).

Pour chaque modalité, la performance du module ICM est comparée à deux autres intelligences artificielles : une première sans le module ICM, avec un algorithme de recherche glouton (« *greedy* ») qui itère à chaque étape pour trouver une solution optimale à petite échelle ; une seconde avec le module ICM mais sans leur méthode d’analyse de l’environnement ; une troisième, comportant le module ICM dédié au calcul de la récompense intrinsèque et leur méthode de simplification de l’environnement.

Leurs résultats ont montré une plus grande exploration pour leur modèle d’intelligence artificielle dotée d’un système de récompense basé sur la curiosité, et ce pour les différentes modalités :

We show that the exploration policy learned in the first level of Mario helps the agent explore subsequent levels faster, while the intelligent walking behavior learned by the curious *VizDoom* agent transfers to a completely new map with new textures. These results suggest that the proposed method enables an agent to learn generalizable skills even in the absence of an explicit goal. ([59], page 2)

Ces résultats sont confirmés dans un article plus récent, réalisés par la même équipe de recherche, visant à évaluer l’efficacité de leur approche dans des contextes plus variés, incluant dorénavant une cinquantaine de jeux d’arcade Atari, et ce sans récompenses extrinsèques [14] :

We have shown that our agents trained purely with a curiosity reward are able to learn useful behaviours : (a) Agent being able to play many Atari

2. Pour plus d’informations : <http://vizdoom.cs.put.edu.pl>

games without using any rewards. (b) *Mario* being able to cross over over 11 levels without reward. (c) Walking like behavior emerged in the *Ant* environment. (d) Juggling like behavior in *Robo-school* environment (e) Rally-making behavior in Two-player *Pong* with curiosity-driven agent on both sides. But this is not always true as there are some Atari games where exploring the environment does not correspond to extrinsic reward. ([14], page 10)

Une limitation est néanmoins discutée dans l'article, liée à l'approche par prédiction qui fonde l'ICM. Un agent motivé uniquement par une récompense associée à une erreur de prédiction risque de se focaliser sur une recherche infinie de surprises, ou d'incongruité, quitte à ne pas suivre un objectif plus global lié à l'exploration de l'ensemble de la carte.

Ils prennent l'exemple d'une tâche où une intelligence artificielle doit sortir d'un labyrinthe, dans lequel se trouve un poste de télévision. Il est possible, sur ce poste, de changer de chaîne à la volée. L'agent, motivé par une curiosité maximisée par la recherche de surprise, va être plus récompensé par le changement successif de chaîne de télévision que par son exploration du labyrinthe, car l'erreur de prédiction est maximale à chaque changement de chaîne. Ce comportement, nommé *couch-potato* en miroir au celui humain de procrastination, limite l'efficacité d'une approche par prédiction.

Les auteurs notent néanmoins que ce comportement n'est pas apparu au travers de leurs expérimentations, qui sont basées sur des jeux vidéo. Cet exemple du labyrinthe et du poste de télévision a été conçu en complément de leur étude.

- Pathak et al. décrivent le comportement d'un agent dont ses stratégies d'exploration d'un espace sont motivées par un état de curiosité simulé.
- Cette curiosité est décrite comme une récompense intrinsèque à l'exploration, basée sur des prédictions de l'agent sur le monde virtuel.
- Les auteurs décrivent l'*Intrinsic Curiosity Module*, un module permettant de calculer le montant de la récompense en fonction d'une erreur de prédiction de l'agent sur l'environnement.
- Dans un environnement nouveau, inexploré, un agent inexpérimenté va réaliser des inductions sur le comportement de l'environnement. Ces prédictions vont s'avérer fausses, et cette erreur de prédiction est la récompense de l'apprentissage : plus l'erreur de prédiction est importante, plus l'agent est récompensé.
- L'erreur de prédiction est ainsi analogue aux processus de surprise et d'incongruité, soit des mécanismes de la nouveauté, influence forte de la curiosité.
- Les auteurs ont démontré l'efficacité de leur module sur les autres algorithmes, et ce dans des environnements virtuels d'apprentissage variés.
- Il existe cependant une limitation à cette approche, la possibilité pour l'agent de procrastiner. En effet, en étant récompensé par la découverte de nouveauté, l'intelligence artificielle risque de passer plus de temps à une recherche de surprises qu'à sortir de l'espace dans lequel elle se trouve. Il s'agit du comportement *couch-potato*, qui ne s'est pour autant pas présenté dans leurs expérimentations basées sur des jeux vidéo.

5.3 Approche par accessibilité de l'information : Episodic Curiosity

Pour éviter que les agents virtuels en tombent dans les travers d'un comportement *couch-potato*, Savino et al. proposent de motiver l'exploration de l'agent par une curiosité basée sur la reconnaissance d'observations nouvelles, et non par une série de prédictions faussées [66].

Leur approche consiste à simuler une mémoire épisodique chez l'agent dont les caractéristiques sont analogues à celle de l'humain, à savoir une mémoire constituée des observations propres de la personne (basée sur son expérience), permettant de se situer dans l'espace et de prédire son comportement, ici l'exploration pour l'agent virtuel. Cette mémoire est au préalable vide en début de tâche. A chaque étape, l'agent compare son observation actuelle de l'environnement avec les précédentes stockées. Une observation qui n'est pas en mémoire est considérée comme nouvelle, générant une récompense associée à cette découverte chez l'agent. Ce dernier ajoute ensuite l'observation nouvelle en mémoire, puis répète ce processus jusqu'à la fin de la tâche, où sa mémoire est effacée.

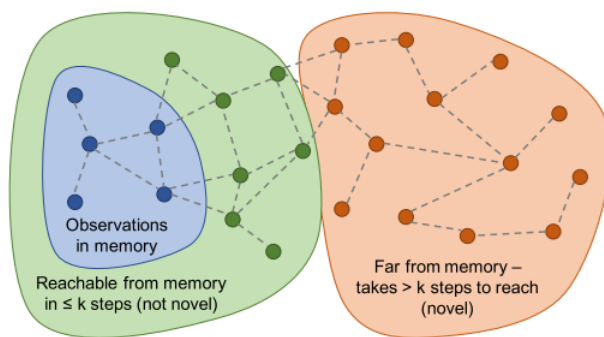


Figure 9 : En bleu, les observations mémorisées. En vert, les observations les plus accessibles de celles mémorisées (ici, avec un écart de 2 noeuds). En rouge, les observations les plus éloignées, considérées comme nouvelles (écart supérieur à 2 noeuds). Figure tirée de [66].

L'ensemble des observations réalisées par l'agent est stockée au cours de la partie, puis remise à zéro en fin de tâche. Les observations les plus récentes sont dites en mémoire. L'agent a néanmoins accès aux observations les plus proches de celles en mémoire, avec lesquelles il peut faire des comparaisons. Seules les observations les plus éloignées de celles en mémoire sont décrites comme nouvelles. La mesure de l'écart entre les observations proches de celles lointaines décrit l'effort que doit réaliser l'agent pour recouvrir sa mémoire. Elle est mesurée par la distance entre chaque observation réalisée dans l'environnement, sous la forme d'un graphe dessiné par un réseau de neurones. La figure 9 résume le fonctionnement de leur approche de la mémoire par l'accessibilité de l'information.

Cette mémoire épisodique permet d'éviter toute procrastination, car l'agent sait dorénavant qu'il a déjà vu cette chaîne, pour reprendre l'exemple du poste de télévision présenté précédemment (section 5.2). Le calcul de la récompense associée à la découverte d'une nouvelle observation est dédié au module de curiosité épisodique, *Episodic Curiosity*, permettant ainsi d'affiner l'apprentissage de l'agent dans l'exploration de l'environnement (voir figure 10).

Les auteurs ont vérifié l'efficacité de leur module EC en comparaison de la méthode ICM précédemment présentée (voir section 5.2), au sein des environnements *VizDoom*, *DeepMind Lab* basée sur une version open-source de *Quake III Arena*³, et *MuJoCo*, un moteur physique dédié à la conception et simulation d'environnement virtuels⁴.

Le dispositif expérimental reprend celui présenté par Pathak et al. [59], en y ajoutant le module EC, des labyrinthes générés de manière procédurale sous *DeepMind Lab* dans lesquels ils simulent le comportement *couch-potato*, et une simulation d'apprentissage de la locomotion pour un agent virtuel sous *MuJoCo*. Leurs résultats ont montré l'efficacité du module EC sur l'ICM : l'agent explore l'environnement plus vite et de

3. Pour plus d'informations : <https://github.com/deepmind/lab>

4. Pour plus d'informations : <http://www.mujo.co.org>

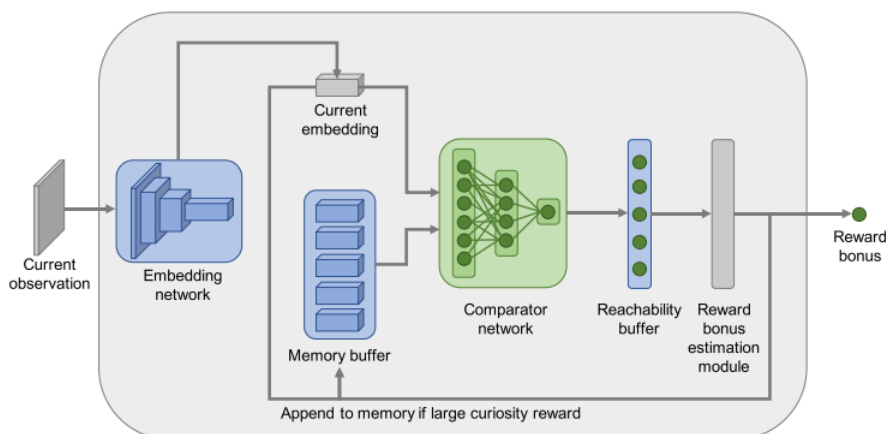


Figure 10 : *Episodic Curiosity Module*, permettant de calculer la valeur de la récompense associée à la découverte d’observations nouvelles dans l’environnement. Figure tirée de [66].

manière plus efficace, tout en permettant d’éviter toute procrastination chez l’agent.

- Pour limiter les effets du *couch-potato*, Savino et al. proposent de motiver l’exploration de l’agent par une curiosité basée sur la reconnaissance d’observations nouvelles, et non par une série de prédictions faussées.
- Leur approche consiste à simuler une mémoire épisodique chez l’agent dont les caractéristiques sont analogues à celle de l’humain. Le calcul de la récompense associée à la découverte d’une nouvelle observation est dédié au module de curiosité épisodique, l’*Episodic Curiosity Module*.
- La curiosité de l’agent est dorénavant portée par la position de l’information en mémoire, l’écart entre l’information actuelle et celle en mémoire définit le caractère de nouveauté.
- Seules les observations les plus éloignées de celles en mémoire sont décrites comme nouvelles. La mesure de l’écart entre les observations proches de celles lointaines décrit l’effort que doit réaliser l’agent pour recouvrer sa mémoire.
- Leurs expérimentations ont montré l’efficacité de leur module sur l’ICM, et sans provoquer de procrastination.

Les exemples présentés permettent de saisir à la fois l’importance de la curiosité dans le développement de stratégies d’exploration, et ce notamment dans un contexte d’apprentissage. Ils donnent aussi à voir une première application informatique des recherches en psychologie cognitive sur un état, certes très discuté dans la littérature, mais néanmoins complexe à circonscrire.

Références

- [1] ABT, C. C. *Serious Games*, 2 ed. Viking Press, New York, N.Y, USA, 1970.
- [2] ALEXANDER, J. T., SEAR, J., AND OIKONOMOU, A. An investigation of the effects of game difficulty on player enjoyment. *Entertainment Computing* 4, 1 (2013), 53–62.
- [3] ALLART, T., LEVIEUX, G., PIERFITTE, M., GUILLOUX, A., AND NATKIN, S. Difficulty Influence on Motivation over Time in Video Games using Survival Analysis. In *Proceedings of Foundation of Digital Games* (Cap Cod, MA, USA, 2017).
- [4] ANG, D., AND MITCHELL, A. Comparing Effects of Dynamic Difficulty Adjustment Systems on Video Game Experience. In *CHI PLAY '17 Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play* (Amsterdam, Pays-Bas, 2017), ACM New York, NY, USA, pp. 317–327.
- [5] APONTE, M.-V., LEVIEUX, G., AND NATKIN, S. Difficulty in Videogames : An Experimental Validation of a Formal Definition. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE 2011* (Lisbon, Portugal, 2011), T. Romão, Ed., ACM New York, NY, USA, pp. 1–18.
- [6] BARANES, A. F., OUDEYER, P. Y., AND GOTTLIEB, J. The Effects of Task Difficulty, Novelty and the Size of the Search Space on Intrinsically Motivated Exploration. *Frontiers in Neuroscience* 8 (2014), 1–9.
- [7] BARTLE, R. Hearts, clubs, diamonds, spades : Players who suit MUDs. *Journal of MUD Research* 1, 1 (1996).
- [8] BATEMAN, C., Ed. *Beyond Game Design : Nine Steps Toward Creating Better Videogames*, 1 ed. Course Technology, 2009.
- [9] BATEMAN, C., AND LOWENHAUPT, R. Player Typology in Theory and Practice. In *Proceedings of DiGRA 2011 Conference : Think Design Play* (Hilversum, the Netherlands, 2011).
- [10] BERLYNE, D. E. A Theory of Human Curiosity. *British Journal of Psychology. General Section* 45, 3 (1954), 180–191.
- [11] BERLYNE, D. E. *Conflict, Arousal, and Curiosity*. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y, USA, 1960.
- [12] BERLYNE, D. E. Curiosity and Exploration. *Science* 153, 3731 (1966), 25–33.
- [13] BLADES, A. Solving mazes with Depth-First Search, 2020.
- [14] BURDA, Y., STORKEY, A., DARRELL, T., AND EFROS, A. A. Large-scale study of curiosity-driven learning. *7th International Conference on Learning Representations, ICLR 2019* (2019).
- [15] CAILLOIS, R. *Les jeux et les hommes : le masque et le vertige*, 2 ed. Gallimard, Paris, France, 1958.

- [16] CHEN, J. Flow in Games (and Everything else). *Commun. ACM* 50, 4 (2007), 31–34.
- [17] COLWELL, A. M., AND GLAVIN, F. G. Colwell’s Castle Defence : A Custom Game Using Dynamic Difficulty Adjustment to Increase Player Enjoyment. In *Proceedings of Artificial Intelligence and Cognitive Science* (Dublin, Ireland, 2018), J. McAuley and S. McKeever, Eds., pp. 275–282.
- [18] CONSTANT, T., BUENDIA, A., ROLLAND, C., AND NATKIN, S. Enjeux et problématiques de conception d’un jeu sérieux pour la prise de décision. *Revue Ingénierie des Systèmes d’Information (ISI)* 20, 1 (2015), 107–131.
- [19] CONSTANT, T., AND LEVIEUX, G. Dynamic Difficulty Adjustment Impact on Players’ Confidence. In *CHI 2019 : CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings* (Glasgow, Scotland, 2019), ACM, p. 12.
- [20] CONSTANT, T., LEVIEUX, G., BUENDIA, A., AND NATKIN, S. From Objective to Subjective Difficulty Evaluation in Video Games. In *INTERACT 2017 : Human-Computer Interaction - INTERACT 2017* (Mumbai, India, 2017), R. Bernhaupt, G. Dalvi, A. Joshi, D. K. Balkrishan, J. O’Neill, and M. Winckler, Eds., Springer, pp. 107–127.
- [21] COSTIKYAN, G. *Uncertainty in Games*, 1 ed. MIT Press, Cambridge, USA, 2013.
- [22] CROSKERRY, P., AND NORMAN, G. Overconfidence in clinical decision making. *The American journal of medicine* 121, 5A (may 2008), S24–9.
- [23] CSIKSZENTMIHALYI, M. *Flow and the Foundations of Positive Psychology : The Collected Works of Mihaly Csikszentmihalyi*, 1 ed. Springer, 2014.
- [24] FERRO, L. S., WALZ, S. P., AND GREUTER, S. Towards personalised, gamified systems : an investigation into game design, personality and player typologies. In *IE ’13 Proceedings of The 9th Australasian Conference on Interactive Entertainment : Matters of Life and Death* (Melbourne, VIC, Australia, 2013), S. Greuter, C. McCrea, F. Mueller, L. Hjorth, and D. Richards, Eds., ACM New York, NY, USA, pp. 1–6.
- [25] FISCHHOFF, B., SLOVIC, P., AND LICHTENSTEIN, S. Knowing with certainty : The appropriateness of extreme confidence. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 3, 4 (1977), 552–564.
- [26] GEE, J. P. *Good video games + good learning*, 1 ed. Peter Lang International Academic Publishers, New York, USA, 2007.
- [27] GREEN, G., AND KAUFMAN, J., Eds. *Video Games and Creativity*, 1 ed. Academic Press, 2015.
- [28] GRIFFIN, D., AND TVERSKY, A. The weighing of evidence and the determinants of confidence. *Cognitive psychology* 411435 (1992), 411–435.
- [29] HENDERSON, B., KELLER, H., AND SCHNEIDER, K., Eds. *Curiosity and Exploration*, 1 ed., vol. 53. Springer, Berlin, Germany, 1994.

- [30] HUCK, J. T., DAY, E. A., LIN, L., JORGENSEN, A. G., WESTLIN, J., AND HARDY, J. H. The Role of Epistemic Curiosity in Game-Based Learning : Distinguishing Skill Acquisition From Adaptation. *Simulation and Gaming* 51, 2 (2020), 141–166.
- [31] JUUL, J. *Half-Real : Video Games between Real Rules and Fictional Worlds*, 1 ed. The MIT Press, Cambridge, UK, 2005.
- [32] KAHNEMAN, D., AND TVERSKY, A. Prospect Theory : An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica* 47, 2 (1979), 263–292.
- [33] KANG, M. J., HSU, M., KRAJBICH, I. M., LOEWENSTEIN, G., MCCLURE, S. M., WANG, J. T.-Y., AND CAMERER, C. F. The Wick in the Candle of Learning : Epistemic Curiosity Activates Reward Circuitry and Enhances Memory. *Psychological Science* 20, 8 (2009), 963–974.
- [34] KASHDAN, T. B., AND SILVIA, P. J. Curiosity and Interest : The Benefits of Thriving on Novelty and Challenge. In *The Oxford Handbook of Positive Psychology*, Shane J. Lopez and C. Snyder, Eds., 2 ed. Oxford University Press, 2012, ch. 34.
- [35] KIDD, C., AND HAYDEN, B. Y. The Psychology and Neuroscience of Curiosity. *Neuron* 88, 3 (2015), 449–460.
- [36] KLIMMT, C., BLAKE, C., HEFNER, D., VORDERER, P., AND ROTH, C. Player Performance, Satisfaction, and Video Game. In *Entertainment Computing ICEC 2009. Lecture Notes in Computer Science* (Paris, France, 2009), S. Natkin and J. Dupire, Eds., vol. 5709 LNCS, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–12.
- [37] KREMERS, R. *Level Design : Concept, Theory, and Practice*, 1 ed. CRC Press, Natick, USA, 2009.
- [38] LAZZARO, N. Why We Play Games : Four Keys to More Emotion Without Story. *Game Developer Conference (GDC)* (2004), 1–8.
- [39] LEVIEUX, G. *Mesure de la difficulté dans les jeux vidéo*. Thèse, Conservatoire National des Arts et Métiers CNAM Paris, 2011.
- [40] LITMAN, J. A. Curiosity as a Feeling of Interest and Feeling of Deprivation : The I/D Model of Curiosity. In *Issues in Psychology of Motivation*, P. R. Zelick, Ed., 1 ed. Nova Publisher, 2007, ch. 10, pp. 149–156.
- [41] LITMAN, J. A. Interest and deprivation factors of epistemic curiosity. *Personality and Individual Differences* 44, 7 (2008), 1585–1595.
- [42] LITMAN, J. A. Epistemic Curiosity, 2012.
- [43] LITMAN, J. A., COLLINS, R. P., AND SPIELBERGER, C. D. The Nature and Measurement of Sensory Curiosity. *Personality and Individual Differences* 39, 6 (2005), 1123–1133.
- [44] LITMAN, J. A., HUTCHINS, T. L., AND RUSSON, R. K. Epistemic curiosity, feeling-of-knowing, and exploratory behaviour. *Cognition and Emotion* 19, 4 (2005), 559–582.

- [45] LITMAN, J. A., AND SPIELBERGER, C. D. Measuring Epistemic Curiosity and Its Diverive and Specific Components. *Journal of Personality Assessment* 80, 1 (2003), 75–86.
- [46] LOEWENSTEIN, G. The Psychology of Curiosity : A Review and Reinterpretation. *Psychological Bulletin* 116, 1 (1994), 75–98.
- [47] MALABY, T. M. Beyond Play : A New Approach to Games. *Games and Culture* 2, 2 (apr 2007), 95–113.
- [48] MALONE, T. W. What makes things fun to learn? A study of intrinsically motivating computer games. Tech. rep., Stanford University, Stanford, USA, 1980.
- [49] MALONE, T. W. Toward a Theory of Intrinsically Motivating Instruction. *Cognitive Science* 5, 4 (1981), 333–369.
- [50] MALONE, T. W. Making Learning Fun : A Taxonomy Of Intrinsic Motivations For Learning. In *Aptitude, Learning and Instruction Volume 3 : Conative and Affective Process Analyses*, R. E. Snow and M. J. Farr, Eds., 1 ed. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, USA, 1987, ch. 10, pp. 223–253.
- [51] MCCLELLAND, D. C., ATKINSON, J. W., CLARK, R. A., AND LOWELL, E. L., Eds. *The Achievement Motive*, 1 ed. Appleton, New York, N.Y, USA, 1953.
- [52] MCCLENDON, M. S. The complexity and difficulty of a maze. *Bridges : Mathematical Connections in Art, Music, and Science* (2001), 213–222.
- [53] MESAENTIER SILVA, F. D., LEE, S., TOGELIUS, J., AND NEALEN, A. AI-based Playtesting of Contemporary Board Games. In *Proceedings of FDG’17* (Hyannis, MA, USA, 2017), ACM, p. 10.
- [54] NACKE, L. E., BATEMAN, C., AND MANDRYK, R. L. BrainHex : A neurobiological gamer typology survey. *Entertainment Computing* 5, 1 (jan 2014), 55–62.
- [55] OUDEYER, P.-Y., GOTTLIEB, J., AND LOPES, M. Intrinsic motivation, curiosity, and learning : Theory and applications in educational technologies. *Progress in Brain Research* 229 (2016), 257–284.
- [56] OUDEYER, P. Y., AND KAPLAN, F. What is intrinsic motivation ? A typology of computational approaches. *Frontiers in Neurorobotics* 3, november (2007), 1–14.
- [57] PANNESE, L., AND MOROSINI, D. Serious Games For Reflective Learning. In *International Conference The Future of Education* (Florence, Italy, 2011), Simionelli.
- [58] PAPERT, S. *Mindstorms : Children, Computers, And Powerful Ideas*, 2 ed. Basic Books, Inc., New York, USA, 1993.
- [59] PATHAK, D., AGRAWAL, P., EFROS, A. A., AND DARRELL, T. Curiosity-Driven Exploration by Self-Supervised Prediction. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2017-July* (2017), 488–489.
- [60] PLUCK, G., AND JOHNSON, H. Stimulating Curiosity to Enhance Learning. *Education Sciences and Psychology*, 2 (2011), 24–31.

- [61] PULFORD, B. D. *Overconfidence in human judgment*. Doctor of philosophy, University of Leicester, 1996.
- [62] PULFORD, B. D., AND COLMAN, A. M. Overconfidence : Feedback and item difficulty effects. *Personality and Individual Differences* 23, 1 (jul 1997), 125–133.
- [63] RANI, P., SARKAR, N., AND LIU, C. Maintaining Optimal Challenge in Computer Games through Real-Time Physiological Feedback Mechanical Engineering. *Task-Specific Information Processing in Operational and Virtual Environments : Foundations of Augmented Cognition 1*, September (2006), 184–192.
- [64] REIO JR, T. G., AND PETROSKO, J. M. The Measurement and Conceptualization of Curiosity. *The Journal of Genetic Psychology* 167, 2 (2006), 117–135.
- [65] RUSSELL, S., AND NORVIG, P. *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, 3 ed., vol. 53. Pearson, 2019.
- [66] SAVINOV, N., RAICHUK, A., MARINIER, R., VINCENT, D., POLLEFEYS, M., LILICRAP, T., AND GELLY, S. Episodic curiosity through reachability. *7th International Conference on Learning Representations, ICLR 2019* (2019), 1–20.
- [67] SHAFFER, D. W. Epistemic Games. *Innovate : journal of online education* 1, 6 (sep 2005).
- [68] SHAFFER, D. W., HATFIELD, D., SVAROVSKY, G. N., NASH, P., NULTY, A., BAGLEY, E., FRANK, K., RUPP, A. A., AND MISLEVY, R. J. Epistemic Network Analysis : A Prototype for 21st-Century Assessment of Learning. *International Journal of Learning and Media* 1, 2 (2009), 33–53.
- [69] SIMON, H. A., AND NEWELL, A. Human problem solving : the state of the theory in 1970. *American Psychologist* 26, 2 (1971).
- [70] SWEETSER, P., AND WYETH, P. GameFlow : A Model for Evaluating Player Enjoyment in Games. *Comput. Entertain.* 3, 3 (2005), 24.
- [71] VOSS, H. G., AND KELLER, H. *Curiosity and Exploration : Theories and Results*, 1 ed. Academic Press, New York, N.Y, USA, 1983.
- [72] WENTWORTH, N., AND WITRYOL, S. L. Curiosity, exploration, and novelty-seeking. In *Well-Being : Positive Development Across the Life Course*, M. H. Bornstein, L. Davidson, C. L. Keyes, and K. A. Moore, Eds., 1 ed. Lawrence Erlbaum Associates, London, UK, 2003, ch. 21, pp. 281–294.
- [73] YANNAKAKIS, G. N., AND TOGELIUS, J. *Artificial Intelligence and Games*, 1 ed. Springer International Publishing, 2017.