



**HAL**  
open science

# Contrôle dynamique de la tension et de la difficulté pour l'entraînement à la gestion du stress en situations de crise en environnement virtuel

Luca Pelissero-Witoslawski

## ► To cite this version:

Luca Pelissero-Witoslawski. Contrôle dynamique de la tension et de la difficulté pour l'entraînement à la gestion du stress en situations de crise en environnement virtuel. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Université de Technologie de Compiègne, 2023. Français. NNT : 2023COMP2790 . tel-04725043

**HAL Id: tel-04725043**

**<https://theses.hal.science/tel-04725043v1>**

Submitted on 7 Oct 2024

**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.



Par Luca PELISSERO-WITOSLAWSKI

*Contrôle dynamique de la tension et de la difficulté  
pour l'entraînement à la gestion du stress  
en situation de crise en environnement virtuel*

Thèse présentée  
pour l'obtention du grade  
de Docteur de l'UTC

Soutenue le 22 décembre 2023

**Spécialité :** Technologies de l'Information et des Systèmes :  
Unité de recherche Heudyasic

D2790

**THESE**  
pour l'obtention du grade de Docteur de  
l'Université de Technologie de Compiègne

**Contrôle dynamique de la tension et de la difficulté pour l'entraînement à  
la gestion du stress en situation de crise en environnement virtuel**

Spécialité : Technologies de l'Information et des Systèmes

Par **Luca PELISSERO-WITOSLAWSKI**

Soutenue le 22 décembre 2023 devant un jury composé de :

M. Nicolas SZILAS	Maître d'Enseignement et de Recherche Université de Genève <i>Rapporteur</i>
M. Pierre DE LOOR	Professeur des universités Technopole Brest-Iroise <i>Rapporteur</i>
Mme Iza MARFISI	Maître de conférences Université du Mans <i>Examinatrice</i>
M. Stéphane CARDON	Maître de conférences Centre de Recherche de Saint-Cyr Coëtquidan <i>Examineur</i>
M. Simon RICHIR	Professeur Institut Arts et Métiers de Laval <i>Examineur</i>
M. Serge BOUCHARDON	Professeur Université de Technologie de Compiègne <i>Examineur</i>
M. Dominique LENNE	Professeur émérite Université de Technologie de Compiègne <i>Directeur</i>
Mme Domitile LOURDEAUX	Maître de Conférences Université de Technologie de Compiègne <i>Directrice</i>



L'allocation de recherche doctorale Contrôle dynamique de la tension et de la difficulté pour l'entraînement à la gestion du stress en situations de crise en environnement virtuel est cofinancée par l'Union européenne dans le cadre du Fonds Européen de développement régional



# Résumé

Les situations de crise sont des situations socio-techniques complexes ayant connu des changements brutaux dans leur fonctionnement. Elles peuvent survenir dans de nombreuses circonstances et dans des domaines très variés. Nous nous intéressons aux situations de crise humanitaires et aux actions civilo-militaires, comme les situations de protection de la population lors de catastrophes naturelles ou de crises sanitaires, ou encore les conflits armés.

Ces situations représentent d'importants enjeux sociétaux en raison de leur multiplication ces dernières années. Elles nécessitent que les opérateurs qui œuvrent à les résoudre soient bien formés. Nous nous intéressons notamment aux compétences des opérateurs à gérer leur stress, une compétence fondamentale dans ce genre d'opération. Une mauvaise gestion du stress des opérateurs est l'une des principales causes des échecs des opérations en situation de crise.

Cependant, les entraînements classiques aux situations de crise soulèvent d'importantes contraintes économiques. C'est pourquoi nous nous intéressons particulièrement à la transposition de ces entraînements dans des environnements virtuels, dont l'un des principaux avantages est de pouvoir proposer une solution mobile et peu coûteuse pour effectuer des entraînements personnalisés et un suivi dynamique de l'évolution des compétences de l'opérateur.

Dans ce contexte, nous proposons une approche en deux modules. Un premier module est en charge de l'ensemble de la création et de la gestion du profil de l'opérateur représentant ses capacités à gérer son stress dans un ensemble non défini de situations d'entraînement s'appuyant sur les masses de croyances transférables afin de gérer l'ensemble des incertitudes liées à la détection du stress. Un second module est en charge de créer dynamiquement l'ensemble des scénarios de formation en s'appuyant sur plusieurs théories narratives et sur le profil de l'opérateur afin de proposer une expérience d'entraînement en adéquation avec ses capacités.

**Mots-clés :** Entraînement ,Adaptation, Dynamique, Réalité Virtuelle, Croyance, Profil, Scénarisation, Stress



# Abstract

Crisis situations are complex socio-technical situations that have experienced abrupt changes in their functioning. They can arise in various circumstances. We focus on humanitarian crisis situations and civil-military actions.

These situations represent significant societal challenges due to their increasing occurrence in recent years. They require that the operators working to resolve them are well-trained. We are particularly interested in the operators' skills in managing their stress. Poor stress management among operators is one of the main causes of failures in crisis operations.

However, traditional crisis situation training poses significant constraints. That's why we are interested in adapting these trainings to virtual environments, one advantage of which is the ability to provide a mobile solution for personalized training and dynamic monitoring of the operator's skill development.

We propose a two-module approach. The first module is responsible for creating and managing the operator's profile, representing their ability to manage stress in a range of training situations to address the uncertainties associated with stress detection. The second module dynamically creates all training scenarios based on multiple narrative theories and the operator's profile, offering a training experience tailored to their abilities.

**Keywords:** Training, Adaptation, Dynamics, Virtual Reality, Belief, Profile, Scripting, Stress



# Remerciements

À toutes celles et ceux sans qui cette thèse n'aurait jamais pu aboutir, je tiens, en ces quelques lignes, à vous remercier.

Tout d'abord, je tiens à remercier Nicolas Szilas et Pierre De Loor d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux. Leurs retours ont été de précieux éléments permettant de préparer au mieux la soutenance, mais également pour parfaire ce manuscrit.

Je tiens également à remercier Iza Marfisi et Stéphane Cardon d'avoir accepté d'examiner mes travaux. L'ensemble des échanges que nous avons pu avoir a été pour moi très enrichissant, tout en me confortant dans l'idée que la recherche est la voie que je veux suivre. Je remercie également Simon Richir, qui en plus d'avoir accepté d'examiner mes travaux, a également été de précieux conseil durant le déroulement de ma thèse.

Plus particulièrement, je tiens à remercier Serge Bouchardon. Je tiens à te remercier pour tout ce que tu m'as permis d'accomplir. Sans cette rencontre pendant les cours que j'ai suivis pendant mon cursus d'ingénieur auprès de toi, je n'aurais jamais pris goût à l'étude de la narration. C'est également à toi que je dois l'envie d'accomplir une thèse, et tu as été de précieux conseils autant pendant les démarches que pendant la réalisation de la thèse. Et je tiens bien sûr à te remercier d'avoir accepté également de présider ce jury.

Une pensée va directement à toutes ces personnes qui ont fait que cette thèse puisse être une réussite. Qu'ils soient collègues, amis, je vous remercie pour tout ce soutien, Florian, Jalil, Romain, Soline, particulièrement, et toutes celles et ceux que j'oublie.

Une thèse, c'est un peu une situation de crise dans une équipe médicale. Une équipe qui reste soudée pour aller de l'avant. Des équipiers, qui sont dans le même train que vous, et avec qui vous vivez cette expérience, ces hauts et ces bas. Pour moi, cette équipe, ce sont mes camarades de bureau mais surtout amis. Antoine, Baptiste et Romain. Aucun remerciement ne sera suffisant pour vous exprimer toute la gratitude que j'ai pour vous. Ce chapitre de ma vie qui s'est écrit sera écrit également de vos plumes, tant vous m'avez apporté humainement. Et je regrette amèrement de ne pas avoir su vous l'exprimer avant, tant vous avez été d'un important soutien moral pendant cette thèse et cette épidémie de Covid-19. Si je n'ai pas lâché, c'est en partie grâce à vous.

J'aimerais également remercier les membres de ma famille, qui ont toujours pris des nouvelles de moi, de ma santé physique comme mentale dans ces quatre années d'épreuves. Mes deux grands-parents, René et Lucette. Votre éducation

et votre soutien m'ont permis d'arriver jusque-là, et de ne pas renoncer. Cette thèse, c'était aussi le moyen de vous rendre fiers. Et je suis heureux d'avoir pu partager à temps ce moment avec vous, chose qui me tenait le plus à cœur.

Mais je tiens surtout à remercier ma mère, Romy. Merci d'avoir tant sacrifié pour moi, de m'avoir soutenu dans tous mes projets. Merci de ne jamais avoir douté de mes choix, de m'avoir réconforté à n'importe quel instant de ma vie, de jour comme de nuit. Merci de m'avoir autant donné d'amour que deux parents, pour que je sois comme les autres petits enfants.

Bien sûr, je remercie les deux personnes qui m'ont le plus suivi durant ce parcours : ma directrice et mon directeur de thèse, Domitile Lourdeaux et Dominique Lenne. Domitile, Dominique, je ne pourrais pas réussir à vous exprimer toute la gratitude que j'ai envers vous. Merci de m'avoir toujours poussé dans ma pensée scientifique, d'avoir toujours su comment me motiver. Merci de votre écoute, même pendant les moments les plus difficiles. Merci de m'avoir donné cette chance. Et j'espère de tout cœur que ce travail vous rend aussi fiers que la fierté que j'ai de vous avoir eus comme directrice et directeur.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
1.1	Contexte . . . . .	6
1.1.1	Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain . . .	6
1.1.2	Scénarisation . . . . .	7
1.2	Motivations . . . . .	8
1.3	Approche . . . . .	9
1.4	Objectifs . . . . .	10
1.5	Problèmes . . . . .	11
1.6	Contribution . . . . .	12
1.7	Cadre d'application . . . . .	12
1.8	Plan du mémoire . . . . .	14
<b>I</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Du stress à l'apprentissage</b>	<b>18</b>
2.1	Stress . . . . .	18
2.1.1	Définition du stress . . . . .	18
2.1.2	Catégorisation du stress . . . . .	20
2.2	Stress et environnement virtuel . . . . .	21
2.3	Apprentissage en situation de stress . . . . .	22
2.3.1	Paradigme cognitiviste . . . . .	23
2.3.2	Paradigme constructiviste . . . . .	23
2.3.3	Influence du stress sur l'apprentissage . . . . .	26

<b>3 Scénarisation automatique et dynamique dans les environnements interactifs</b>	<b>30</b>
3.1 Engagement et Flow . . . . .	30
3.2 Structures narratives . . . . .	34
3.2.1 Monomythe . . . . .	35
3.2.2 Modèle épiphanique . . . . .	39
3.2.3 Contes du Gange . . . . .	40
3.3 Scénarisation dans les environnements interactifs . . . . .	42
3.3.1 Narration interactive . . . . .	42
3.3.2 Scénarisation d’environnements virtuels pour l’apprentissage ou l’entraînement en situation de crise . . . . .	43
<b>II Contributions</b>	<b>46</b>
<b>4 Profil dynamique du stress de l’apprenant</b>	<b>50</b>
4.1 Conception du profil . . . . .	50
4.1.1 Observables et capteurs . . . . .	51
4.1.2 Incertitudes . . . . .	54
4.1.3 Représentation des stresseurs . . . . .	56
4.2 Création du profil . . . . .	59
4.2.1 Domaine d’entraînement . . . . .	59
4.2.2 Représentation spatiale . . . . .	61
4.2.3 Masses de croyance . . . . .	66
4.3 Fonctionnement du profil . . . . .	69
4.3.1 Fusion de croyances de sources simultanées . . . . .	70
4.3.2 Fusion de croyances lors d’une propagation . . . . .	74
4.3.3 Révision . . . . .	76
<b>5 Moteur de scénarisation dynamique d’entraînement à la gestion du stress</b>	<b>77</b>
5.1 Une scénarisation pour les situations de crise . . . . .	77
5.1.1 Théorie narrative des contes du Gange . . . . .	77
5.1.2 Une approche semi-scriptée . . . . .	79
5.2 Éléments de description du scénario . . . . .	80
5.2.1 Nœud . . . . .	81
5.2.2 Fragment . . . . .	82

5.2.3	Segment . . . . .	83
5.3	Création du scénario . . . . .	83
5.3.1	Sélection des classes de situations . . . . .	84
5.3.2	Création des segments narratifs . . . . .	87
5.3.3	Assemblage des segments narratifs . . . . .	92
5.4	Utilisation du scénario . . . . .	94
5.4.1	Modification dynamique du scénario . . . . .	95
5.4.2	Mise à jour du profil de l'apprenant . . . . .	99
<b>III</b>	<b>Mise en oeuvre et expérimentation</b>	<b>100</b>
<b>6</b>	<b>Mise en oeuvre</b>	<b>102</b>
6.1	Implémentation du profil . . . . .	102
6.1.1	Gestion et représentation des stressseurs . . . . .	102
6.1.2	Interface graphique . . . . .	107
6.2	VICTEAMS2 . . . . .	112
6.2.1	Ajouts 3D . . . . .	112
6.2.2	Ajouts dans le moteur . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>119</b>
7.1	Profil . . . . .	119
7.1.1	Hypothèses . . . . .	119
7.1.2	Protocole . . . . .	120
7.1.3	Résultats - Formulaire de pré-expérimentation . . . . .	127
7.1.4	Résultats - Données de l'environnement virtuel . . . . .	129
7.1.5	Résultats - Étude statistique . . . . .	131
7.1.6	Résultats - Discussions . . . . .	138
7.2	Scénarisation . . . . .	141
7.2.1	Hypothèses . . . . .	141
7.2.2	Protocole . . . . .	141
7.2.3	Résultats - Formulaire de pré-expérimentation . . . . .	144
7.2.4	Analyse post-expérimentation . . . . .	144
7.2.5	Résultats - Discussions . . . . .	146

<b>IV Conclusion et Perspectives</b>	<b>149</b>
<b>8 Conclusion</b>	<b>151</b>
<b>9 Discussions et Perspectives</b>	<b>153</b>
9.1 Perspectives . . . . .	153
9.1.1 Perspectives du profil . . . . .	153
9.1.2 Gestion des croyances . . . . .	156
9.1.3 Comparaison et validation . . . . .	160
9.1.4 Perspective de la scénarisation . . . . .	162
<b>10 Éthique</b>	<b>164</b>
10.0.1 Individu et stress . . . . .	164
10.0.2 Individu et utilisation d'un entraînement en réalité virtuelle	166
10.0.3 Gestion des données des individus . . . . .	168

# Chapitre 1

## Introduction

Les travaux que nous allons présenter dans cette thèse traitent de la conception et du développement d'un profil de compétence dans un contexte d'entraînement à la gestion du stress de l'apprenant et des méthodes permettant de faire évoluer ce profil au travers d'un environnement virtuel pour l'apprentissage humain. L'objectif de ces travaux est de proposer un cadre complet permettant le suivi du stress de l'apprenant et la scénarisation des entraînements qui sont liés.

### 1.1 Contexte

Les travaux que nous avons réalisés s'inscrivent dans le contexte des Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain et de la scénarisation d'entraînement pour ces environnements.

#### 1.1.1 Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain

Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH) définissent l'ensemble des systèmes permettant d'assister un processus d'apprentissage humain par le biais de la mise en place d'environnements virtuels dédiés.

##### **Environnement Virtuel [Burkhardt et al., 2003]**

Système interactif permettant à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir avec un monde artificiel, généralement en trois dimensions, par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles

Les EVAH sont ainsi des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) utilisant un environnement virtuel, le plus souvent immersif.

Ces EIAH ont pour but de permettre le développement de compétences chez des individus utilisant le système que l'on nomme apprenants [Carpentier, 2015a]. Plus précisément, certains d'entre eux comme les Systèmes Tutoriels Intelligents (STI) permettent de fournir à l'apprenant des services tutoriels adaptatifs [Toussaint et al., 2015].

### **Système Tutoriel Intelligent [Clancey, 1984]**

Système qui utilise des techniques d'intelligence artificielle pour représenter des connaissances et mener une interaction avec un élève.

De nombreux STI existent, appliqués à de nombreux domaines. Ces domaines sont très variés, allant de l'apprentissage de langues [Bakeer and Abu-Naser, 2019] à l'apprentissage de circuits électriques [Albatish et al., 2018]. La plupart s'appuient sur des théories de l'apprentissage humain pour développer leurs stratégies d'enseignement [Woolf, 2010]. De nombreux outils existent pour le développement de STI, comme des frameworks utilisant le *Intelligent Tutoring System Builder* (ITSB) [Naser, 2016] ou le *Emotion-Sensitive ITS* (EITS) [Malekzadeh et al., 2015], ou encore de nombreux algorithmes d'aide à la prise de décision pédagogique [Latham et al., 2014; Badaracco and Martínez, 2013; Bourrier, 2019].

La particularité des EVAH est de permettre d'inclure dans le travail des compétences un ensemble riche d'interactions grâce aux différents dispositifs que proposent la technologie de la réalité virtuelle, et qui peuvent notamment être utilisés comme outil narratif dans l'élaboration de l'ensemble des scénarios d'entraînement.

### **1.1.2 Scénarisation**

Nous nous intéressons dans nos travaux à la scénarisation dans les EVAH, c'est à dire à l'étude des différentes méthodes de création d'un scénario. Le scénario peut prendre plusieurs définitions, selon le domaine dans lequel il s'applique.

Dans notre cadre d'étude, nous allons devoir créer des scénarios pour des environnements virtuels. La spécificité de ces scénarios réside en la capacité de l'utilisateur à interagir directement avec l'environnement qui l'entoure.

Nous nous appuierons sur la définition suivante d'un scénario pour nos travaux.

### **Scénario [Barot, 2014]**

Ensemble d'événements particuliers, partiellement ordonnés et instanciables dans un environnement virtuel.

Ainsi, la scénarisation a pour but dans notre contexte de créer cette suite d'évènements. Cependant, nous nous sommes également intéressés à la définition du scénario dans un contexte de divertissement, comme dans la littérature ou le théâtre. On parlera alors aussi d'un *canevas* pour décrire la structure chronologique des évènements de l'oeuvre dans ces contextes.

Il existe plusieurs canevas correspondant à des structures narratives différentes. Le plus usité est le **monomythe** [Campbell, 2008], qui tente de s'imposer comme une représentation universelle des scénarios des histoires classiques et contemporaines. Cependant, l'émergence de nouvelles théories narratives, plus à même de représenter certaines situations bien spécifiques dans les EVAH, soulèvent des questions de représentation.

L'intérêt de ces structures dans la scénarisation des EVAH est de proposer une structure éprouvée à la modélisation des scénarios. Ainsi, la tâche de scénarisation serait non pas de trouver un agencement entre un ensemble particulier d'évènements répondant à des objectifs pédagogiques [Carpentier, 2015a], mais de trouver la meilleure structure narrative informatizable permettant de répondre aux besoins de représentations du scénario dans l'EVAH.

## 1.2 Motivations

Nous nous intéressons particulièrement à la génération dynamique d'entraînements et à la représentation d'environnements socio-techniques complexes, et plus précisément aux situations de crise.

Nous définissons ces situations comme suit.

### Situation de crise

Situation socio-technique complexe ayant connu des changements brutaux dans son fonctionnement.

Les situations de crise peuvent survenir dans de nombreuses circonstances et dans des domaines très variés. Nous nous intéressons aux situations de crise humanitaires et aux actions civilo-militaires, comme les situations de protection de la population lors de catastrophes naturelles ou de crise sanitaire, ou encore les conflits armés.

Ces situations représentent d'importants enjeux sociétaux de par leur multiplication ces dernières années. Elles nécessitent que les opérateurs qui oeuvrent à les résoudre soient bien formés. Nous nous intéressons notamment aux compétences des opérateurs à gérer leur stress, compétence fondamentale dans ce genre d'opération. Une mauvaise gestion du stress des opérateurs est l'une des causes principales des échecs des opérations en situation de crise.

Cependant, les entraînements classiques aux situations de crise soulèvent des contraintes économiques importantes. Ces entraînements néces-

sitent une logistique importante en termes d'équipement et en terme d'acteurs pour pouvoir avoir lieu en grandeur nature [Burkhardt et al., 2006]. C'est pourquoi nous nous intéressons particulièrement à la transposition de ces entraînements dans des environnements virtuels, dont l'un des principaux avantages est de pouvoir proposer une solution mobile et peu coûteuse pour effectuer des entraînements.

Les environnements virtuels offrent également la possibilité de coupler la modélisation des situations d'entraînements à des modules d'intelligence artificielle pour proposer un suivi et un parcours adapté à chaque apprenant [Laforcade and Laghouaouta, 2021]. On parle alors de personnalisation de l'apprentissage.

### **Personnalisation de l'apprentissage [Mandin et al., 2015]**

Façon de placer la personne dans une situation adaptée à ses capacités, attentes et besoins. Son objectif peut être l'individualisation de l'apprentissage, c'est à dire le placement de la personne en autonomie face à ce qu'elle apprend.

Cette personnalisation est au coeur de nos travaux car cette dernière peut permettre de proposer de nouveaux types d'entraînement et un suivi complet individuel qu'il est très difficile d'obtenir lors d'entraînements en grandeur nature.

## **1.3 Approche**

Pour personnaliser les scénarios en fonction de la capacité de l'apprenant à gérer son stress, il est important de pouvoir quantifier cette capacité dans un profil. Les objectifs liés à ce profil sont multiples. Ce profil doit être capable de représenter l'ensemble des situations stressantes que l'apprenant est susceptible de rencontrer lors d'une opération. Il est également capable d'associer à chacune de ces situations la capacité de l'apprenant à gérer son stress dans cette dernière.

Nous voulons également offrir un outil permettant de créer un parcours personnalisé parmi les différentes situations stressantes que nous proposons à l'apprenant. Nous avons ainsi développé des algorithmes permettant à l'apprenant d'explorer les différentes situations de son entraînement selon plusieurs stratégies de parcours permettant d'adapter l'entraînement au rythme de l'apprenant ou aux besoins du formateur.

Cependant, la détection du stress est soumise à beaucoup d'incertitudes. La question de cette détection est encore de nos jours une question de recherche complexe. Cette détection passe par l'utilisation de capteurs physiologiques, nécessitant un traitement des données qu'ils collectent. Cette question du traitement des données ne faisant pas l'objet de cette thèse, nous nous

reposons sur les avancées actuelles dans le domaine. Cependant, nous avons développé notre profil afin qu'il puisse évoluer au fil des avancées en matière de détection du stress. Nous nous sommes pour cela notamment inspirés de profils prenant en compte des incertitudes pour réaliser notre propre profil.

Nous couplons cette personnalisation du parcours de l'apprenant à des scénarios d'entraînements adaptés à son profil. Pour cela, nous nous appuyons sur les algorithmes de parcours du profil que nous avons développés afin de déterminer les différentes situations d'entraînements à travailler lors de la prochaine session.

Nous pensons que l'utilisation de différentes théories narratives peuvent fournir un canevas pour la création d'un scénario dans le but de maintenir l'intérêt de l'apprenant pour la formation et créer de la tension. L'objectif est ainsi de maintenir l'apprenant dans un état de **flow** bénéfique à l'apprentissage [Csikszentmihalyi, 1990; Chen, 2007].

### Flow [Csikszentmihalyi, 1990]

État mental atteint par une personne lorsqu'elle est complètement plongée dans une activité et qu'elle se trouve dans un état maximal de concentration, de plein engagement et de satisfaction dans son accomplissement

## 1.4 Objectifs

Notre approche tente de répondre à la question de recherche générale suivante : comment mettre en place un entraînement aux situations de crise tout en prenant compte les capacités propres de chaque individu de manière automatique ?

Pour cela, nous avons souhaité mettre en place une proposition répondant à plusieurs critères constituant nos principaux objectifs. Ces critères, qui ont régi à la fois la conception mais aussi la réalisation de notre proposition, sont les suivants.

- Un profil du stress de l'apprenant construit **dynamiquement** en s'appuyant sur des capteurs ;
- Un moteur de scénarisation **personnalisé** prenant en compte les capacités de l'apprenant ;
- Des outils **réutilisables** dans plusieurs cas d'applications ;
- Des outils **paramétrables** par le formateur.

Nous pouvons dès lors définir plus précisément nos questions de recherche.

- Comment mettre en place un profil permettant de suivre dynamiquement les capacités de l'apprenant à gérer son stress en situation de crise ?
- Comment prendre en compte les multiples incertitudes liées à l'obtention des données physiologiques et à leur interprétation ?
- Comment exploiter le profil pour proposer dynamiquement des entraînements à la gestion du stress à l'apprenant ?
- Comment parcourir le profil de l'apprenant au moyen d'algorithmes d'aide à la décision pédagogique ?
- Comment assurer au formateur le caractère paramétrables du profil et du moteur ?

### 1.5 Problèmes

De ces objectifs nous pouvons déjà entrevoir plusieurs problèmes qui se poseront lors de la conception du profil, ainsi que son utilisation dans le cadre d'une génération de scénario dynamique utilisable en EVAH.

La première difficulté majeure réside en la détection du stress et l'interprétation des données issues de cette détection.

La détection du stress repose sur des techniques utilisant majoritairement des capteurs physiologiques. Or, il existe une multitude de capteurs, proposant des méthodes de détections différentes, et des précisions différentes. La première problématique est donc d'utiliser des capteurs qui ne gêneraient pas l'utilisation d'un EVAH, tout en proposant des méthodes de détections les plus précises possibles. Cependant, l'utilisation de tels dispositifs est aujourd'hui encore débattue dans la communauté scientifique, du fait de leur imprécision et des nombreuses difficultés liés à la détection et l'analyse du stress [Ayres, 2020; Crosswell and Lockwood, 2020; Saredakis et al., 2020].

La création d'un tel profil soulève donc des problèmes de conception liés à la nature même des données que nous allons employer. Mais il soulève également des problèmes d'éthique liés à la génération de situations stressantes, qui pourraient dans certaines circonstances conditionner l'apprenant, et créer des problèmes comportementaux.

Enfin, un problème majeur réside en l'existence d'une dualité entre nos objectifs pédagogiques et la liberté offerte à l'apprenant dans un environnement virtuel : le paradoxe narratif [Aylett, 1999]. L'apprenant par ses actions pourrait se détourner du scénario établi, voire mettre en péril sa résolution.

## 1.6 Contribution

Notre contribution se divise en deux éléments que nous traitons en parallèle :

- Un profil représentant la capacité de l'apprenant à gérer son stress ;
- Un modèle utilisable par un moteur de scénarisation permettant de représenter des situations de crise sous forme d'entraînement.

Afin de gérer les incertitudes liées au profil de l'apprenant, nous proposons de nous appuyer sur le cadre formel de la théorie des fonctions de croyances qui généralise d'autres cadres permettant de gérer les incertitudes (e.g. théorie des réseaux bayésiens, des ensembles flous, etc.). Grâce à ce cadre, nous pouvons faire évoluer dynamiquement le profil et affiner les connaissances sur les compétences de l'apprenant au fur et à mesure que l'apprenant est confronté aux situations durant son entraînement.

Concernant le modèle de scénarisation, nous proposons deux sous-contributions. La première porte sur la sélection des situations d'entraînement dans ce profil. Le choix de la prochaine situation à travailler doit être suffisamment difficile pour que l'apprenant progresse sans trop l'être afin d'éviter la mise en échec de l'apprenant. Nous avons fait le choix d'opérationnaliser la théorie de l'apprentissage socio-constructiviste de Vygotsky [1980]. Cette théorie considère qu'il existe une distance entre les concepts à apprendre et ceux déjà appris. La construction des parcours doit veiller à cette distance. Notre moteur de scénarisation doit sélectionner la situation la plus adaptée à chaque apprenant, on parle alors de personnalisation. Chaque formateur ayant des stratégies différentes pour faire progresser l'apprenant, nous avons également proposé différents algorithmes de sélection (sélection arbitraire, recherche glouton et k plus proches voisins).

La seconde sous-contribution porte sur la théorie narrative. Les structures narratives classiques ne pouvant pas convenir à la représentation d'une situation de crise, nous avons exploré des structures jusque là inutilisées dans la conception des scénarios d'EVAH. Nous avons proposé d'utiliser la théorie des contes du Gange afin de fournir un ensemble de règles de construction de scénario à but pédagogique en situation de crise, utilisable dans un système de scénarisation. Nous avons également détaillé un formalisme permettant de décrire l'ensemble des situations d'entraînements générées par le profil, ainsi que des règles permettant d'inclure des théories narratives permettant de travailler certaines compétences spécifiques.

## 1.7 Cadre d'application

Le cadre d'application que nous avons décidé d'utiliser au cours de nos travaux est l'environnement virtuel VICTEAMS [Lourdeaux et al., 2019] (Fi-

gure 1.1).

Initialement, VICTEAMS est un environnement virtuel conçu dans le but de permettre la mise en place d'entraînements destinés à des leaders d'équipes médicales aux compétences non-techniques dans des contextes de situations de crise.

### Compétences non-techniques [Flin et al., 2008]

Ensemble formé des compétences cognitives et sociales ainsi que ses ressources personnelles qui complètent les compétences techniques.

Dans l'environnement, l'apprenant incarne ainsi le leader d'une équipe de plusieurs personnages non joueurs.



Figure 1.1 – Environnement virtuel VICTEAMS2

La tâche confiée à l'apprenant est la gestion des différentes ressources matérielles et humaines de l'avant-poste médical dans lequel il évolue. Par le biais d'interactions présentées sous forme de menus, utilisables grâce aux contrôleurs de l'équipement de réalité virtuelle, l'apprenant est capable de donner des ordres complexes à l'ensemble de son unité.

Dans le cadre de notre approche, nous envisageons la mise en œuvre de scénarios d'entraînement caractérisés par une progression graduelle de l'intensité des difficultés. Il est essentiel que cette progression demeure perceptible pour chaque apprenant, bien que la perception de la difficulté puisse varier individuellement et conduire à des manifestations de stress. Par conséquent, nous proposons une approche destinée à l'entraînement à la gestion du stress en situation de crise, tout en maintenant la coexistence des exercices conventionnels, notamment ceux liés à la respiration par exemple.

## 1.8 Plan du mémoire

Le plan du mémoire est structuré en cinq parties :

### **Première partie : Etat de l'art**

— *Chapitre 2 : Du Stress à l'apprentissage*

Ce chapitre présente les différents travaux autour de la définition du stress ainsi que sa détection. Il décrit également les différents liens existant entre stress et apprentissage.

— *Chapitre 3 : Scénarisation automatique et dynamique dans les environnements interactifs*

Ce chapitre présente la narration interactive et présente plusieurs théories narratives permettant la structuration d'un scénario. Il présente également le principe des scénariseurs et compare leurs différents types.

### **Deuxième partie : Contributions**

— *Chapitre 4 : Profil dynamique du stress de l'apprenant*

Ce chapitre présente les différents travaux autour de la conception et la mise en place des différents éléments de notre profil dynamique du stress de l'apprenant.

— *Chapitre 5 : Moteur de scénarisation dynamique d'entraînement à la gestion du stress*

Ce chapitre présente l'ensemble des concepts et travaux autour de la création de notre moteur de scénarisation dynamique d'entraînement à la gestion du stress dans le cadre des situations de crise.

### **Troisième partie : Mise en oeuvre et expérimentation**

— *Chapitre 6 : Mise en oeuvre*

Ce chapitre présente l'ensemble des développements effectués permettant de représenter l'ensemble de notre contribution. Il couvre également les développements menés afin de disposer d'un démonstrateur pour nos expérimentations.

— *Chapitre 7 : Expérimentation*

Ce chapitre présente l'ensemble des expérimentations que nous avons menés afin de tester les différents éléments de notre contribution. Nous présenterons pour chaque expérimentation le protocole ainsi que le résultat détaillé.

### **Quatrième partie : Conclusion et Perspectives**

— *Chapitre 8 : Conclusion*

Ce chapitre aborde l'ensemble de nos contributions présentés dans ce mémoire, en résumant les différents avantages et nouveautés proposés par nos travaux.

— *Chapitre 9 : Discussions et Perspectives*

Ce chapitre traite des différents inconvénients de notre contribution ainsi que de perspectives qui seront abordées dans de futurs travaux.

— *Chapitre 10 : Éthique*

Ce chapitre présente plusieurs réflexions autour de l'éthique que soulève notre approche, notamment en matière de protection des personnes et d'utilisation des données.

# **Première partie**

## **Etat de l'art**

Afin de comprendre les objectifs de notre problématique, il est important de saisir les enjeux qui y sont associés. Pour ce faire, nous proposons d'examiner ces enjeux à travers une revue des travaux existants dans cette partie dédiée à l'état de l'art. Nous explorerons les avancées réalisées dans la définition et la détection du stress, ainsi que dans la classification du stress. Nous étudierons également les différents mécanismes par lesquels le stress influence l'apprentissage, ainsi que les différents paradigmes liés.

Dans cette revue de l'état de l'art, nous examinerons également plusieurs théories et concepts clés relatifs à la narration et à la scénarisation d'environnements interactifs. De plus, nous présenterons plusieurs solutions existantes afin de situer notre propre approche.

---

<b>2 Du stress à l'apprentissage</b>	<b>18</b>
2.1 Stress . . . . .	18
2.1.1 Définition du stress . . . . .	18
2.1.2 Catégorisation du stress . . . . .	20
2.2 Stress et environnement virtuel . . . . .	21
2.3 Apprentissage en situation de stress . . . . .	22
2.3.1 Paradigme cognitiviste . . . . .	23
2.3.2 Paradigme constructiviste . . . . .	23
2.3.3 Influence du stress sur l'apprentissage . . . . .	26
<b>3 Scénarisation automatique et dynamique dans les environnements interactifs</b>	<b>30</b>
3.1 Engagement et Flow . . . . .	30
3.2 Structures narratives . . . . .	34
3.2.1 Monomythe . . . . .	35
3.2.2 Modèle épiphanique . . . . .	39
3.2.3 Contes du Gange . . . . .	40
3.3 Scénarisation dans les environnements interactifs . . . . .	42
3.3.1 Narration interactive . . . . .	42
3.3.2 Scénarisation d'environnements virtuels pour l'apprentissage ou l'entraînement en situation de crise . . . . .	43

---

# Chapitre 2

## Du stress à l'apprentissage

Stress et apprentissage sont deux processus fondamentaux pour l'humain, faisant l'objet de nombreuses études. Qu'ils soient pris indépendamment ou ensemble, beaucoup de travaux ont pour objectif de comprendre ces mécanismes afin de les maîtriser.

Dans ce chapitre, nous allons définir le stress et l'apprentissage au travers des situations de crise sur lesquels nous travaillons. Nous décrirons également les enjeux d'un tel travail au travers d'une étude d'autres travaux sur le stress et l'apprentissage.

### 2.1 Stress

Afin de bien comprendre les enjeux et les problématiques liés à l'étude du stress et à son utilisation dans des systèmes, nous devons définir ce qu'est le stress. Nous étudierons également les différentes théories du stress ainsi que différentes catégorisations du stress que nous avons pu explorer lors de la réalisation de nos travaux.

#### 2.1.1 Définition du stress

Bien que le stress soit une notion connue depuis plusieurs siècles, sa définition précise fait encore aujourd'hui l'objet de débats.

[Selye, 1956] approche la notion de stress en décrivant le « **syndrome général d'adaptation** », à savoir « l'ensemble des modifications qui permettent à un organisme de supporter les conséquences d'un traumatisme naturel ou opératoire ».

Ces modifications peuvent peut-être assimilées à la stratégie mise en place par le corps pour réaffecter de l'énergie pour atteindre les états d'homéostasie ou d'allostasie, en réaction à l'induction du stress dans le but de maintenir l'équilibre dans le corps humain.

### Homéostasie

Stabilisation, réglage chez les organismes vivants, de certaines caractéristiques physiologiques (pression artérielle, température, etc.).

### Allostasie

Processus ramenant un organisme à son équilibre physiologique interne.

[Lazarus and Folkman, 1984] définissent le stress comme une « transaction particulière entre un individu et une situation dans laquelle celle-ci est évaluée comme débordant ses ressources et pouvant mettre en danger son bien-être ». Cette transaction est mesurable par une estimation de l'effet produit par un événement sur l'individu ainsi que par la façon dont l'individu va faire face à cette situation mettant en danger son bien-être. Ces situations seront qualifiées de situations stressantes.

Ce « faire-face » est décrit comme un mélange entre deux mécanismes distincts, l'un comportemental et l'autre cognitif. Ils développeront cette notion et la nommeront *coping*, définit par « les efforts déployés volontairement par un individu pour faire face à une situation qu'il évalue comme stressante, impliquant que cette situation est perçue comme difficile à surmonter et menaçante pour son bien-être ». Ces efforts mettent en jeu les capacités de décision de la personne en état de stress. Selon [Dewe, 2017], l'ensemble de ces mécanismes serait propre à chaque individu

Selon Kim et Diamond (2002) [Kim and Diamond, 2002], le stress peut être défini par le biais de trois composantes distinctes :

- l'excitation, définie comme « l'état de l'activité corticale déclenchée par la formation réticulaire sous-corticale qui entraîne une augmentation de l'éveil, la vigilance, le tonus musculaire et la réponse autonome (comme la fréquence cardiaque ou la fréquence respiratoire) » [Cohen and Law, 2011];
- l'aversion, définie comme « une indication montrant que le sujet éviterait ou devrait atténuer l'intensité du facteur de stress s'il en avait l'occasion » [Kim and Diamond, 2002];
- l'incontrôlabilité, définie par « les événements qu'une personne ne peut pas contrôler » [Breier et al., 1987].

Nous nous reposerons sur la théorie transactionnelle du stress [Lazarus and Folkman, 1984; Biggs et al., 2017]. Bien que d'autres théories définissent également le stress, comme la *Generalized Unsafety Theory of Stress* [Brosschot et al., 2018], nous avons fait le choix de nous reposer sur la définition que nous avons le plus retrouvée lors de notre état de l'art. Il est également à noter que la définition du stress ne soit pas unifiée sous une seule et même définition [Epel et al., 2018].

Cependant, dans le cadre de nos travaux, nous simplifierons la complexité du stress humain, du fait que nous ne voulons utiliser que la présence ou non de stress pour définir les comportements de notre système. Nous nous reposerons uniquement sur des mesures permettant de déterminer quand le stress survient suite à l'interaction avec le monde qui entoure l'apprenant [Schneiderman et al., 2005] ainsi que les différents impacts sur ses fonctions physiologiques et sa capacité de prise de décision. En d'autres termes, nous nous intéressons plus particulièrement à l'utilisation des mesures liées à l'excitation et à l'étude de l'aversion chez l'apprenant lorsque celui-ci fait face à une situation d'incontrôlabilité.

Nous omettons dans notre étude l'ensemble des mécanismes biologiques de déclenchement du stress car notre approche ne dépend pas dans la compréhension exacte de l'ensemble de ces mécanismes. Nous nous intéresserons uniquement aux mesures psychologiques et en partie aux mesures physiologiques produites par le déclenchement des mécanismes du stress, c'est à dire aux éléments mesurables de l'excitation. Ces éléments sont mesurés grâce à des capteurs provoquant le moins d'intrusions possibles lors de l'utilisation d'un équipement de réalité virtuelle, et dont le traitement peut se faire en parallèle de l'exécution de l'environnement virtuel. Ainsi, nous sommes contraint d'utiliser un ensemble d'éléments stressant qui sont utilisables dans ces environnements virtuels.

### 2.1.2 Catégorisation du stress

Nous nous intéressons particulièrement aux éléments stressants qui sont utilisables lors d'une session d'entraînement en environnement virtuel. Nous cherchons ainsi à déterminer s'il existe un ensemble de ces éléments, regroupés sous une catégorisation qui serait exploitable dans notre approche et qui permettrait de déterminer des sous-ensembles de situations d'apprentissage proches.

Les différents événements provoquant les situations stressantes sont appelés stresseurs. Ces stresseurs peuvent être de natures différentes, et provoquer sur l'humain différentes réactions.

Afin de créer un profil de l'apprenant permettant de suivre l'évolution de sa maîtrise de son stress pendant des situations de crise et de fonder notre approche sur des similarités entre ces situations, nous avons besoin de déterminer des groupes de stresseurs présentant des propriétés communes. Plusieurs travaux proposent des catégorisations pour cela.

Communément, on oppose les stresseurs physiques aux stresseurs psychologiques [Monroe and Slavich, 2016]. Ensuite sont différenciés les stresseurs aigus (courts, soudains et éphémères) des stresseurs chroniques (longs, rémanents et perdurant dans le temps) [Fink, 2007; Dougall and Baum, 2012].

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons tout particulièrement aux stresseurs psychologiques aigus, qui sont les plus présents lors des

opérations en situation de crise, ainsi que les seuls que nous pouvons gérer dans un environnement virtuel. À cette catégorie peuvent s'ajouter des sous-catégories, permettant de définir plus précisément les stressseurs.

Plusieurs travaux définissent et utilisent de telles sous-catégories. Le modèle C.I.N.E. est un modèle récent que nous avons étudié, découpant les stressseurs aigus en quatre catégories distinctes [Lupien and Auger, 2020; Lupien, 2020] :

- Contrôle : stress ressenti lors d'une situation avec peu ou aucun contrôle ;
- Imprévisibilité : stress ressenti suite à l'apparition d'un élément inattendu ;
- Nouveauté : stress ressenti suite à l'apparition d'un élément nouveau ;
- Ego menacé : stress ressenti quand les compétences sont mises à l'épreuve.

Selon cette théorie, un stressseur appartient à une ou plusieurs de ces catégories. Il sera perçu de plus en plus stressant selon le nombre de catégories auquel il appartient.

Cependant, ce modèle souffre d'un manque de validation, et a été peu mis en oeuvre, notamment dans les EVAH.

Nous avons exploré d'autres théories classifiant les stressseurs selon leur cadre d'application ou selon l'environnement de la personne [Dewe et al., 2012]. De ces théories émergent de nouvelles catégories qui vont raffiner et préciser la catégorisation divisant les stressseurs en aigus et chroniques. C'est notamment le cas des stressseurs organisationnels [Wethington, 2000], propres à un environnement de travail. Ces théories peuvent coexister, ce qui permet une catégorisation précise de l'ensemble des stressseurs, que l'on retrouve généralement sous forme taxonomique. Il nous est alors possible de créer, par le biais de ces spécifications, une catégorisation qui serait propre à notre cas d'étude. Il nous est également possible de créer des sous-catégories, bien plus précises, qui nous permettraient de rassembler l'ensemble des stressseurs qui sont très proche sémantiquement.

Nous utiliserons les catégorisations de [Dougall and Baum, 2012; Dewe et al., 2012; Wethington, 2000] qui ont l'avantage de permettre une définition précise des stressseurs grâce à une utilisation conjointe avec une taxonomie, permettant une construction compréhensible pour l'apprenant et les experts.

## 2.2 Stress et environnement virtuel

Le stress peut trouver sa source dans la nouveauté d'une situation [Lupien and Auger, 2020].

Cette nouveauté peut notamment être liée à la découverte et à l'utilisation d'un nouvel outil, comme par exemple un outil technologique tel qu'un dispositif de réalité virtuelle. On parle alors de **technostress** [Brod, 1984; Kupersmith, 1992]. Nous nous appuyerons sur la définition suivante.

**Technostress [Weil and Rosen, 1997]**

Ensemble des impacts négatifs sur les attitudes, les pensées, les comportements ou la psychologie causés directement ou indirectement par la technologie.

[Kim et al., 2022] listent quatre facteurs au déclenchement du technostress qui s'appliquent à l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle :

- Surcharge cognitive, provoquée par « une trop grande quantité d'informations fournies par la nouvelle technologie submergeant les utilisateurs et provoquant un ralentissement dans l'exécution de leurs tâches » ;
- Complexité, à savoir le stress ressenti à « l'utilisation, l'apprentissage et la maîtrise d'une nouvelle technologie jugée trop difficile » ;
- Privacité, à savoir le stress ressenti à « la possibilité que l'utilisation de la nouvelle technologie puisse être tracée, documentée et exploitée par d'autres personnes » ;
- L'inclusion, à savoir « la pression exercée pour être capable d'utiliser la nouvelle technologie comme tout le monde créant un sentiment d'infériorité et de stress ».

Ainsi, l'utilisation des outils de réalité virtuelle pourrait être un frein à l'étude de la capacité de l'apprenant à gérer son stress. L'existence du technostress est donc à prendre en compte dans nos travaux lors de l'étude des signaux du stress chez l'apprenant [La Torre et al., 2019].

Plus généralement, le technostress est une forme de stress qui, va avoir une influence sur les capacités de l'apprenant [Souchet et al., 2022a], notamment sur sa capacité d'apprentissage.

Le technostress partageant les mêmes signaux physiologiques avec le reste des stressseurs, nous devons ainsi prendre en compte son existence lors de leur analyse que nous obtiendrons au moyen des capteurs utilisés pour développer le profil pendant les entraînements. Ainsi, le profil devra refléter cette incertitude supplémentaire lors de sa conception et de sa création.

## 2.3 Apprentissage en situation de stress

La conception d'un système de scénarisation adaptatif à l'entraînement à la gestion du stress au moyen d'EVAH nécessite de disposer d'un cadre formel permettant de comprendre les mécanismes de l'apprentissage humain.

Les sciences cognitives parlent de **paradigme d'apprentissage**. Ces paradigmes sont associés à une méthode d'apprentissage, qui permet alors de la conceptualisation de notre approche. Nous comparons deux paradigmes très souvent utilisés lors de la production de STI : les paradigmes cognitiviste et constructiviste.

Nous présenterons également les liens existants entre les effets du stress et le processus d'apprentissage.

### 2.3.1 Paradigme cognitiviste

Le paradigme d'apprentissage cognitiviste est un paradigme fournissant une méthode tenant compte des différents processus cognitifs en activité lors de la réalisation d'une tâche par l'apprenant [Woolf, 2010]. Ainsi, l'apprentissage selon les cognitivistes est un processus modulaire dans sa façon de traiter et retenir de l'information, s'appuyant sur les divers canaux sensoriels pour traiter l'information environnante [Fodor, 1985; Pietraszewski and Wertz, 2022].

Les modèles cognitivistes simplifiés de la mémoire la découpent en deux éléments distincts : la mémoire à court terme et la mémoire à long terme. L'apprentissage selon ces modèles est donc un processus de stockage de l'information obtenue par les divers canaux sensoriels de l'individu dans la mémoire à court terme qui devient une connaissance lorsque ces informations sont transférées vers la mémoire à long terme.

Le paradigme cognitiviste est grandement utilisé dans la mise en place de STI spécifiques que l'on nomme « tuteurs cognitifs ». Ces derniers sont capables de résoudre les problématiques posées à l'apprenant en imitant le processus cognitif humain dans un premier temps, puis de tutorer l'apprenant sur les difficultés qu'il rencontre à des étapes particulières de son propre processus cognitif [Anderson, 1983; Anderson et al., 1990].

On retrouve l'utilisation de ces STI dans des cadres d'application variés, comme l'apprentissage de connaissances mathématiques [Koedinger and Anderson, 1993] ou encore pour des connaissances liées à des métiers comme la médecine [Chernikova et al., 2022].

### 2.3.2 Paradigme constructiviste

Le paradigme d'apprentissage constructiviste est un paradigme selon lequel un apprenant assimile des connaissances lorsque ce dernier interagit avec son environnement. On parle également de paradigme centré interaction. Au sein de ce paradigme, plusieurs stratégies d'apprentissage concurrentes fournissent un cadre théorique de l'apprentissage humain. Nous proposons d'étudier plusieurs de ces stratégies.

### **Constructivisme selon Piaget [Piaget, 1935]**

Selon Piaget, l'apprentissage résulte d'une construction mentale de l'apprenant au sein de l'ensemble de ses propres représentations. Selon ce paradigme, l'apprentissage ne résulte ainsi pas de l'appropriation d'une connaissance externe.

Piaget décrit cette construction mentale par le biais de deux processus : l'**assimilation** et l'**accommodation**.

#### **Assimilation**

Processus mis en place lorsque une nouvelle connaissance est directement intégrée car conforme aux représentations propres de l'apprenant.

#### **Accommodation**

Processus mis en place lorsque une nouvelle connaissance rentre en conflit avec les représentations propres à l'apprenant. On parle également d'apprentissage résultant d'une erreur ou d'un échec.

Piaget considère ainsi que chaque savoir est unique et propre à chaque personne, car se construisant dans sa propre représentation de la réalité.

### **Zone Proximale de Développement de Vygotsky [Vygotsky, 1980]**

Selon Vygotsky, l'apprentissage résulte d'un échange à la fois entre l'apprenant et son environnement, mais également un échange avec des pairs initiés. On parle alors de **socio-constructivisme**.

Vygotsky théorise son approche dans le concept de la Zone Proximale de Développement (ZPD).

#### **Zone Proximale de Développement**

Distance entre le niveau de développement actuel (ZDA), tel que l'on pourrait le déterminer par les capacités de l'enfant à résoudre seul des problèmes, et le niveau de développement potentiel, tel que l'on pourrait le déterminer à travers la résolution de problèmes par cet enfant, lorsqu'il est aidé par des adultes ou collabore avec des pairs initiés.

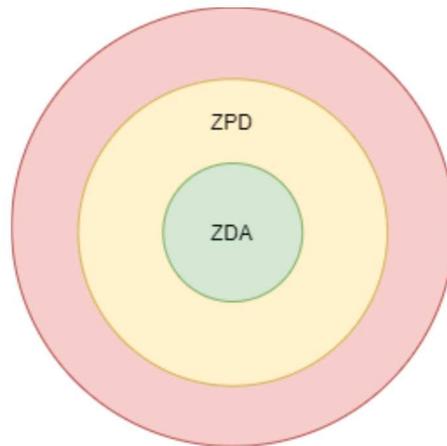


Figure 2.1 – Schématisation du principe de la théorie de Vygotsky. La ZPD est représentée en jaune, tandis que la ZDA est représentée en vert. En rouge est représentée la zone des compétences qui sont considérées comme hors de portée

Cette définition peut être étendue à des contextes plus larges que l'éducation, notamment à la formation professionnelle.

Plusieurs travaux visent également à substituer l'échange avec *des pairs* par des échanges avec un STI. Dans ce cadre, le STI doit pouvoir fournir des *feedbacks* générés en fonction de la difficulté de l'exercice et du niveau de l'apprenant. Ces STI tendent ainsi à adapter le contenu de la formation en fonction des capacités de l'apprenant.

Ces adaptations peuvent être de l'ordre d'une modulation de l'activité proposée, ou encore de la difficulté de l'exercice [Luckin et al., 1999; Murray and Arroyo, 2002; Beal et al., 2010; Carpentier, 2015a].

### **Cycle d'apprentissage expérientiel de Kolb**

S'appuyant sur les travaux de Piaget, Kolb décrit l'apprentissage comme un processus où l'expérience personnelle est au centre, et suit un cycle selon quatre étapes nommé **cycle d'apprentissage expérientiel**.

#### **Cycle d'apprentissage expérientiel**

Le cycle d'apprentissage expérientiel se découpe selon les phases suivantes :

- L'expérience concrète, l'état de l'individu s'engageant dans une activité qui lui est nouvelle ;
- L'observation réflexive, l'état de l'individu prenant du recul sur son activité, de manière collaborative de préférence, permettant de mettre en évidence les éléments que l'individu intégrera comme connaissance ;

- La conceptualisation abstraite, l'état de l'individu internalisant et construisant la connaissance dans ses propres représentations ;
- L'expérimentation active, l'état de l'individu tentant de mettre en application les nouvelles connaissances qu'il aura acquises, dans le cadre de la même activité ou dans une activité proche.

Ce cycle est représentatif des formations à des domaines complexes [Carpentier, 2015a], comme les formations classiques soumises aux équipes de secours, ou les formations de leaders d'équipes médicales. Ces formations généralement proposées sous forme de jeu de rôles grandeur nature, sont décomposées selon ces phases : premier exercice, débriefing commun avec les formateurs, puis nouvel exercice suite aux critiques portées sur les bons et mauvais comportements de chaque apprenant.

Bien que le cycle d'apprentissage de Kolb soit le modèle le plus utilisé dans le cadre des formations aux situations de crise, nous avons préféré sélectionner le modèle de la Zone Proximale de Développement. Notre but étant de proposer un parcours adaptatif de l'entraînement au stress dans un environnement virtuel, la ZPD semble plus intéressante, car elle permet de détecter des situations qui sont proches les unes des autres, et de réduire ainsi le nombre d'entraînements à effectuer au sein de l'environnement virtuel.

### 2.3.3 Influence du stress sur l'apprentissage

En parallèle des paradigmes qui définissent le mécanisme d'apprentissage, de nombreux travaux tendent à montrer une corrélation entre le stress et l'apprentissage.

L'effet du stress sur la mémoire est multiple. [Lazarus and Folkman, 1984] différencie un « bon stress » bénéfique dans la mise en place des stratégies de coping d'un « mauvais stress » qui entrave ce processus de création de ces stratégies.

Des études expérimentales déterminent les conditions permettant l'émergence d'un stress bénéfique à l'apprentissage. [Cahill et al., 2003; Beckner et al., 2006; McCullough and Yonelinas, 2013]. Plusieurs modèles complémentaires naissent des études sur les effets du stress [Wolf, 2009; Shields et al., 2017; Sazma et al., 2019], définissant les différents processus influençant le processus de mémorisation.

[Marin et al., 2019] proposent cette représentation schématique :

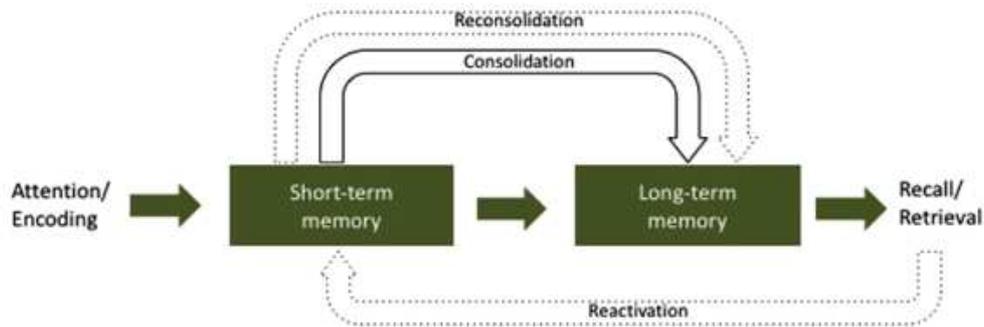


Figure 2.2 – Schématisation du processus de la mémorisation [Marin et al., 2019]

- L’encoding, mécanisme permettant à un individu d’intégrer des connaissances dites instables et de les mémoriser dans sa mémoire à court terme,
- La consolidation, mécanisme permettant à un individu d’intégrer durablement les connaissances récemment acquises et de les transférer dans sa mémoire à long terme,
- Le rappel, mécanisme où les connaissances mémorisées dans la mémoire à long terme vont être transférées dans la mémoire à court terme afin d’être réutilisées,
- La réactivation, mécanisme où les connaissances dites stables de la mémoire à long terme vont redevenir instables afin d’être utilisées dans la mémoire à court terme en vue d’un nouveau cycle de consolidation.

Le modèle du *dual-mode* [] est intéressant aussi car il définit des temporalités d’effet du stress sur les capacités de mémorisation, et donc ainsi des contraintes temporelles qu’il est intéressant de suivre lors de la génération de scénario présentant des stressseurs. Il détermine que le stress a un fort impact durant les trente premières minutes suivant le stressseur sur les capacités d’encoding de manière bénéfique. Puis, le stress influe sur les heures suivantes sur les mécanismes de consolidation.

Cependant, le stress peut aussi se révéler être un inhibiteur aux fonctions de mémorisation. [Marin et al., 2019] compare cela au modèle en U renversé de la loi de Yerkes-Dodson [Yerkes et al., 1908] selon laquelle la performance est au plus bas lorsque la pression est peu ou trop intense.

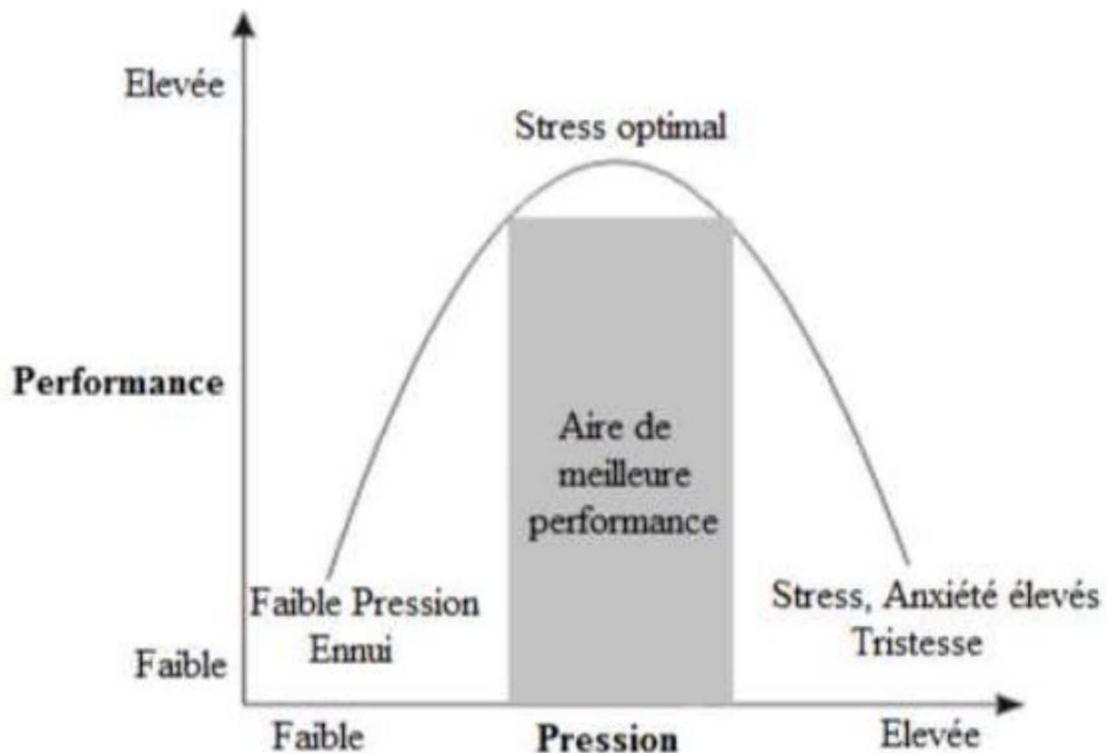


Figure 2.3 – Schématisation de la loi de Yerkes-Dodson [Yerkes et al., 1908]

Cependant, ce stress optimal est spécifique à chaque apprenant. Il dépend des capacités des apprenants à gérer leur stress en fonction du stressleur auquel ils sont confrontés.

### Stress et apprentissage - Résumé

Le stress est une notion au coeur de nombreux travaux de recherches.

Communément, le stress se définit par un ensemble de processus cognitif perturbant l'état d'homéostasie d'un individu. Unique à chacun, ce dernier est détectable grâce à des capteurs.

Le stress peut être décrit comme une interaction entre l'individu et son environnement. Cette interaction va engendrer des perturbations dans ses capacités cognitives.

Le stress a notamment une influence sur les capacités d'apprentissage. Plusieurs paradigmes décrivent les mécanismes de l'apprentissage. Nous avons décidé de nous concentrer sur l'utilisation d'un modèle constructiviste, issu d'un paradigme selon lequel la construction de la connaissance résulte d'une interaction avec l'environnement.

La difficulté de nos travaux réside dans l'informatisation de la ZPD, tout

en prenant en compte la composante du stress dans l'élaboration d'un profil capable de s'adapter à chaque apprenant. Ainsi, l'objectif est de proposer un profil permettant un parcours reflétant le caractère unique de chaque individu face à ses capacités à gérer son stress.

Cependant, il sera aussi nécessaire de prendre en compte certains freins que nous avons pu mettre en évidence comme le technostress, lié à l'utilisation de la réalité virtuelle, ou encore la difficulté à jauger les stressseurs afin de maintenir l'apprenant dans des états bénéfiques à l'entraînement.

## Chapitre 3

# Scénarisation automatique et dynamique dans les environnements interactifs

Problème complexe en terme de conception et de réalisation, la scénarisation des environnements interactifs, comme les environnements virtuels, est un sujet de recherche traité par de nombreuses communautés différentes.

Afin de proposer des scénarios construits dans le but d'être à la fois cohérents, personnalisés et engageants pour l'apprenant, nous nous intéressons aux différentes théories narratives décrivant la structure de scénario, ainsi que leur utilisation dans divers scénariseurs qui ont vu le jour.

Nous étudierons également différents environnements interactifs utilisés dans le cadre de l'apprentissage, disposant notamment de scénariseurs proposant des scénarios dynamiques, automatiques et personnalisés.

### 3.1 Engagement et Flow

L'un des objectifs intrinsèques de l'utilisation d'un EVAH est de maintenir l'intérêt de l'apprenant sur les tâches qui lui sont confiées. On cherche alors à le déconnecter du monde réel afin qu'il puisse s'immerger le plus possible dans l'environnement virtuel dans lequel les formateurs lui proposent d'évoluer.

Le concept d'**immersion** a plusieurs définitions dans le langage commun. Nous nous intéressons ici à deux de ses définitions :

- Fait de se retrouver dans un milieu étranger sans contact direct avec son milieu d'origine ;
- Fascination d'un spectateur pour une œuvre telle qu'il se sent transporté, capturé par celle-ci.

Dans ces définitions, le sentiment d'absorption, de transport dans un monde différent est important.

Dans leurs études de 1998 sur la mesure du sentiment de présence en environnement virtuel, Witmer and Singer [1998] vont définir les notions d'immersion, de présence et d'engagement.

Ils définissent l'**immersion** comme « un état psychologique caractérisé par la perception de soi comme étant enveloppé par un environnement qui fournit un flux continu de stimuli et d'expériences, comme étant inclus dans et en interaction avec celui-ci ». Ils citent quatre facteurs influant directement sur ce sentiment d'immersion :

- La perception de soi dans l'environnement virtuel ;
- L'isolation de l'environnement physique ;
- La perception de son propre mouvement ;
- Un contrôle et des interactions naturels.

Selon eux, et selon ces quatre facteurs, une personne consciente de son mouvement et capable d'interagir avec le monde qui l'entoure au sein de l'environnement virtuel est susceptible d'être en immersion. Celle-ci peut alors s'identifier totalement à l'avatar qu'elle incarne, et va vivre des expériences au travers de cet avatar. Ce principe est aussi commun avec le cinéma, la littérature, ou encore le jeu vidéo en général.

D'autres auteurs comme [Brown and Cairns, 2004] ont pu décrire le concept, et ce plus spécifiquement pour les environnements virtuels. Ils définissent l'immersion comme « l'exposition d'un utilisateur à un environnement virtuel à l'aide de dispositifs occultant en partie la perception de son environnement alentour, pour afficher en lieu et place une image du monde virtuel ». L'immersion ici est caractérisée comme une superposition de l'environnement virtuel sur le réel.

[Brown and Cairns, 2004], dans leur étude et leur analyse sur l'immersion dans le domaine du jeu vidéo, théorisent l'immersion en la découpant en trois niveaux différents. Dans leur définition, l'immersion renvoie au degré d'implication dans le jeu. Cette implication évolue en fonction du temps passé et des barrières limitant l'immersion, comme la faculté du joueur à se concentrer sur les objectifs, ou encore des barrières liés au jeu en lui-même, comme sa construction ou sa difficulté. C'est cette implication qui définit les trois niveaux de l'immersion dans la théorie de Brown et Cairns.

On retrouve les niveaux suivants :

- L'engagement ;
- La concentration ;
- L'immersion totale.

[Brown and Cairns, 2004; Csikszentmihalyi, 2020; Chen, 2007] mettent également en relation leur définition du concept d'immersion avec celui du

*flow* [Csikszentmihalyi, 1990].

### Flow [Csikszentmihalyi, 1990]

« Etat mental atteint par une personne lorsqu'elle est complètement plongée dans une activité et qu'elle se trouve dans un état maximal de concentration, de plein engagement et de satisfaction dans son accomplissement »

Csikszentmihályi ajoute que le *flow* est un état de plaisir, de concentration sans aucun effort, le ressenti d'une tâche réalisée sans difficulté. Pour lui, l'état ne peut être présent que si les buts de l'activité sont définis clairement. L'activité doit se faire sans que la personne n'ait besoin de se poser des questions, et qu'elle puisse savoir que ses actions sont les bonnes, au travers de *feedbacks*. Il faut également que l'activité mette au défi la personne et ses compétences.

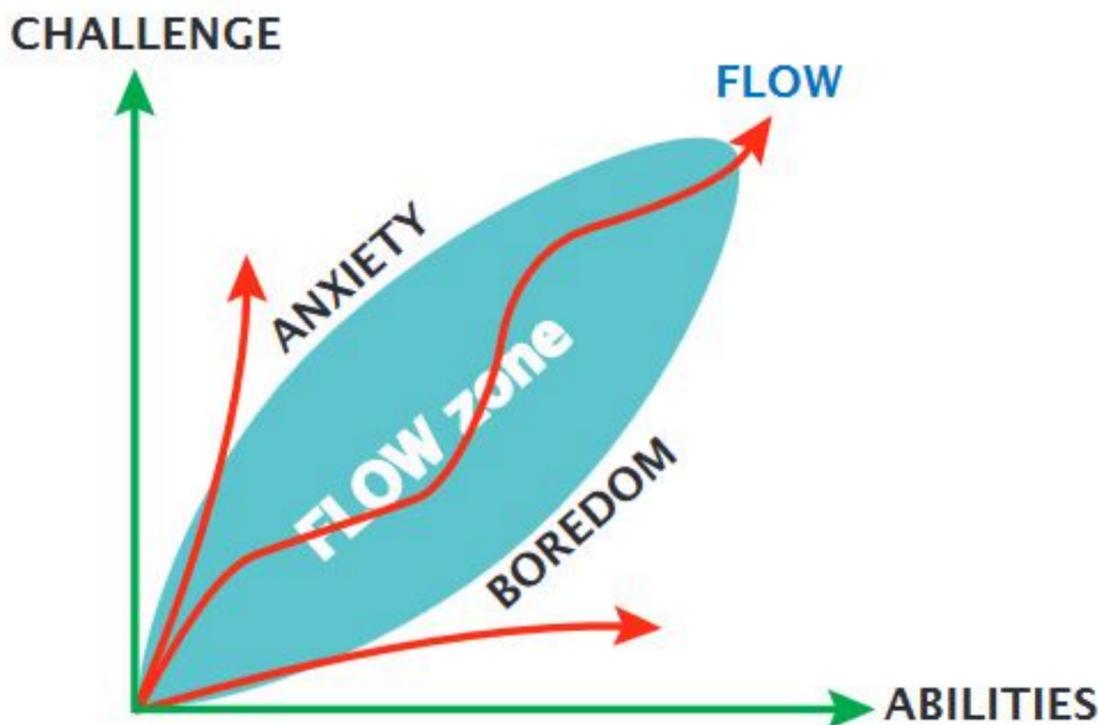


Figure 3.1 – Schématisation de la théorie du *flow* de Csikszentmihályi, dans Chen [2007]

Ces états étant propices à l'apprentissage et à l'assiduité de l'apprenant, il serait intéressant de réussir à faire entrer ce dernier dans cet état, tout en veillant à ce que la mise en place de ces états ne se fassent pas au détriment de l'apprentissage. Cette balance entre immersion, engagement et concentration semble complexe à atteindre. De plus, cette état de plaisir pourrait se révéler être, finalement, un frein au bons développement des compétences.

[Chen, 2007] s'inspire des travaux de Csíkszentmihályi sur le *flow* pour proposer un moyen d'augmenter l'expérience interactive de toute technologie, et ce pour le plus grand nombre d'utilisateurs. Il rejoint les propos de [Brown and Cairns, 2004] sur le parallèle entre la description de l'immersion et la description du *flow*. Il insiste sur le fait que le *flow* est un état dans lequel les performances (dont les capacités d'apprentissage) sont les meilleures, et que cet état n'est accessible qu'en cas d'équilibre entre la difficulté des tâches à accomplir, le challenge que ces tâches procurent et les compétences du joueur.

Si la tâche est trop facile par rapport aux compétences de la personne, celle-ci va s'ennuyer et se désintéresser du jeu. À l'inverse, si le challenge de la tâche se révèle être trop dur à exécuter pour l'utilisateur, celui-ci va ressentir de la frustration, de l'anxiété. Chen explique que les joueurs ont des compétences et des attentes de défi différentes. Pour lui, il faut donc adapter la difficulté des tâches au niveau des personnes afin qu'elles puissent ressentir du plaisir et entrer dans un état de *flow*.

Dans le domaine du jeu vidéo, le *Game Balancing* est l'ensemble des techniques mises en place par un développeur pour mettre au même niveau l'IA du jeu et celui du joueur. Dans les *serious games*, il s'agira de maintenir une difficulté de la simulation en adéquation avec le niveau de l'apprenant. Dans les deux cas, le *game balancing* a pour but de maintenir l'intérêt du joueur et de favoriser le *flow*. [Levieux, 2011] définit trois niveaux de difficulté :

- la difficulté sensorielle : « l'effort que doit fournir le joueur pour obtenir des informations nouvelles et pertinentes sur l'état de l'univers du jeu » ;
- la difficulté logique : « l'effort que doit fournir le joueur pour exploiter les informations dont il dispose, c'est-à-dire comprendre le fonctionnement de l'univers par induction, et choisir la prochaine action à effectuer par déduction » ;
- la difficulté motrice : « le niveau de précision spatiale et temporelle dont le joueur doit faire preuve lorsqu'il exécute une action ».

Il propose également deux moyens pour évaluer ces difficultés : via des joueurs et grâce à des tests de jouabilité, ou par des IA douées de technique d'apprentissage. La difficulté suit également une courbe, la courbe de difficulté, qui est souvent commune entre les jeux.

Afin de jouer directement sur la difficulté, [Andrade et al., 2006] proposent quatre méthodes différentes :

- Un contrôle manuel de l'environnement directement lors de l'utilisation du jeu, qui a pour principal défaut d'être manuel, forçant le joueur à s'auto-évaluer ;
- De modifier le comportement du jeu via des modèles pré-définis. Ce

modèle a pour défaut de ne pas permettre aux excellents joueurs rivalisant avec le comportement du jeu le plus complexe de rencontrer des difficultés et de se sentir défier ;

- le *Machine Learning*, à savoir créer une IA qui va apprendre à jouer contre elle-même ou contre des joueurs afin de parfaire ses connaissances et ses techniques. Le principal problème est que le machine learning n'autorise pas de régression dans le niveau de l'IA, alors qu'un joueur pourrait régresser de niveau ;
- Le *Reinforcement Learning*, qui est un mélange de *machine learning* avec des capacités de sélection de modèles de comportement suivant le niveau du joueur.

Dans tous les cas, le *game balancing* va suivre trois étapes, à savoir l'identification d'un profil utilisateur, l'analyse de l'évolution du niveau du joueur et l'adaptation du jeu, manuel ou automatique.

Cependant, la simple mise en place de techniques de game balancing ne nous semblent pas suffisant pour la mise en place d'un état propice aux entraînements en environnement virtuel que nous voulons mettre en place. Ainsi, nous nous sommes également intéressés aux structures narratives, permettant de fournir un ensemble de règles d'écriture de scénarios et s'assurant d'une cohésion narrative entre les évènements.

## 3.2 Structures narratives

Le structuralisme est un courant de pensée né au XXème siècle. Selon ce courant, tout concept peut être représenté sous forme de structure. Appliqué à la linguistique, on parle de linguistique structurale, qui est à l'origine du concept de schéma narratif.

Selon cette théorie, le schéma narratif est le déroulement d'un récit où les actions s'enchaînent logiquement suivant une structure fixe.

Il n'y a pas qu'un seul schéma narratif. Des auteurs ont mis en avant plusieurs découpages d'un récit possible. On retrouve par exemple le schéma actantiel [Greimas, 1966] ou encore le schéma quinaire [Larivaille, 1974].

### Schéma actantiel

Structure d'analyse narrative qui permet de décomposer un récit en différents actes et d'identifier les rôles et les interactions entre les personnages impliqués dans l'histoire.

### Schéma quinaire

Structure de pensée et d'organisation qui consiste en une division de l'ensemble en cinq parties distinctes qui représentent les étapes de dé-

veloppement du récit.

Rappelons que notre objectif est de permettre à un apprenant de s'entraîner en utilisant un environnement virtuel tout en lui offrant une expérience immersive qui favorisera sa concentration, et dont les objectifs proposés à travers un scénario seront en adéquation avec son niveau de compétence. L'objectif est donc de maintenir chez lui un état de *flow*.

Pour arriver à cet objectif, nous devons utiliser des scénarios proposant un récit dont les enchaînements d'évènements se font de manière logique du point de vue du récit. Nous nous sommes intéressés pour cela aux structures narratives agissant comme un modèle pour la génération de scénarios.

### **3.2.1 Monomythe**

Nous nous sommes tout particulièrement intéressés au modèle du monomythe. Ce concept autrement intitulé « Voyage du Héros » est développé par [Campbell, 2008]. Selon cette théorie, toutes les légendes et mythes du monde suivent un même modèle narratif et une même structure (Figure 3.2).

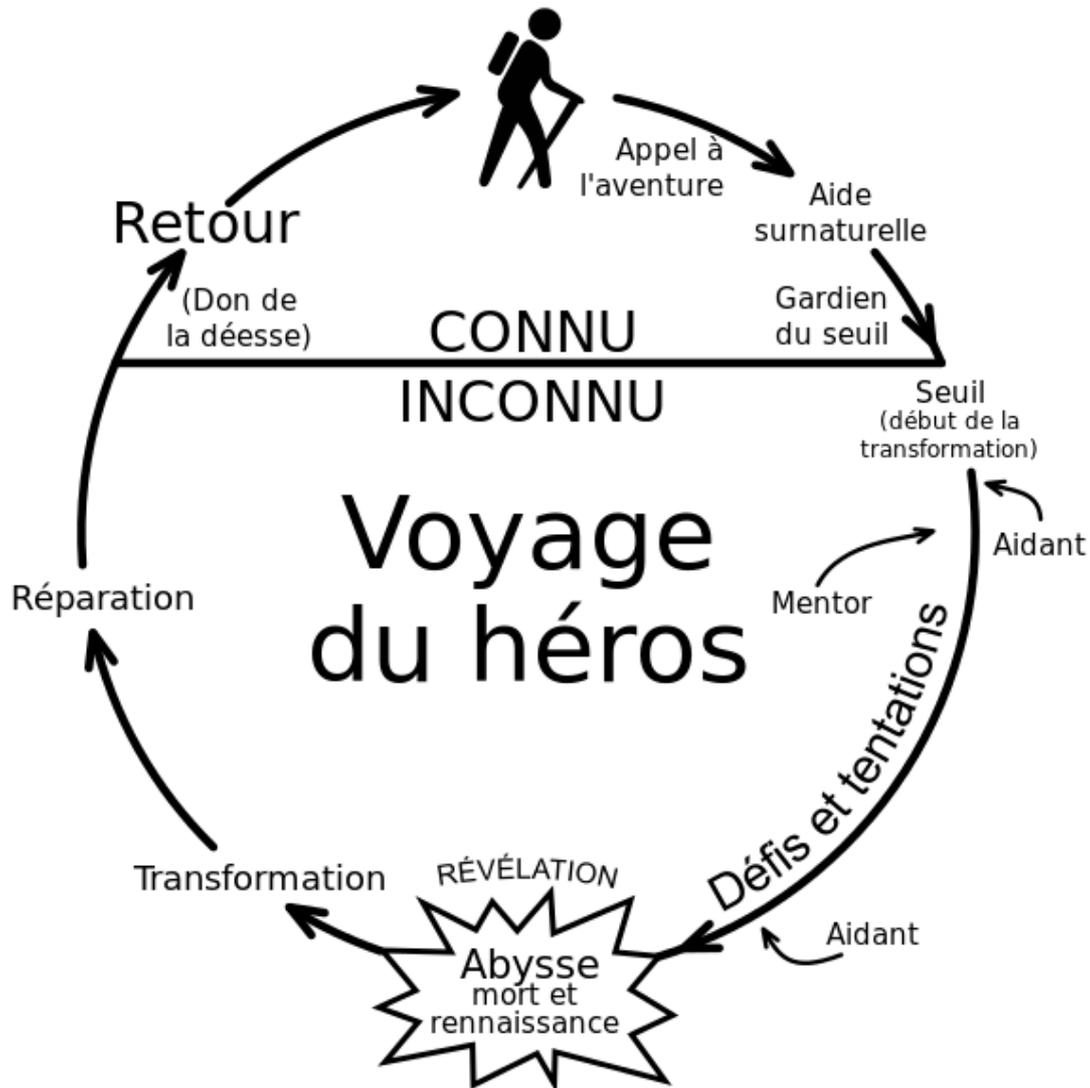


Figure 3.2 – Schématisation du monomythe [Campbell, 2008]

Le monomythe est un enchaînement, parfois cyclique, d'événements décrivant les différentes étapes que rencontre le héros afin de résoudre une problématique qui vient perturber un état initial du récit.

Détaillons les étapes clés communes entre les oeuvres de fictions et les scénarios d'apprentissage :

- La situation initiale est dépourvue de problématique. L'appel à l'aventure vient troubler le quotidien du héros, sous forme d'un objectif ou d'une quête. Dans le cadre des scénarios en EVAH, nous pouvons faire le parallèle avec l'ensemble des événements occurrents entre l'entrée dans l'environnement et le moment où l'apprenant se voit confier une tâche. L'instigateur de cette tâche sera le plus souvent le mentor ;
- Le seuil décrit le début du voyage du héros. Il sera parsemé de tâches en vue de réussir la quête finale confiée au héros, les défis et tenta-

- tions. Ces défis ont pour but de forger le héros et de faire travailler ses forces et ses compétences. Dans un scénario en EVAH, ces défis correspondent aux différentes tâches à réaliser afin de se rapprocher de l'objectif confié au début de l'unité pédagogique. Le héros et l'apprenant seront aidés de leur mentor, ainsi que d'autres personnages ;
- L'abysse décrit une étape dans le récit où le héros échoue à résoudre sa quête finale que l'on lui a confié. Dans les oeuvres de fiction, cet échec est lié au manque de compétences du héros, ou à son échec à tirer les bénéfices de l'ensemble des péripéties qu'il aura traversées. En EVAH, cette étape consistera à créer une situation où les compétences de l'apprenant ne seront pas suffisantes pour réussir la tâche demandée, et lui faire comprendre où sont ses points faibles, afin qu'il puisse les retravailler lors de l'étape de la transformation ;
  - La réparation est l'étape où le héros se confronte une seconde fois à son objectif initial, mais dans un état où il aura pris en compte son précédent échec et les raisons qui ont conduit à son échec lors de l'étape de la transformation.

Ce modèle est le plus utilisé lorsqu'il s'agit de décrire un scénario. C'est une structure éprouvée, grandement utilisée dans des oeuvres narratives ayant un but de divertissement, ou bien encore dans le domaine de la recherche. Beaucoup de travaux s'appuient sur le monomythe pour fournir des règles de scénarisation ou de développement de profil de l'apprenant [Champagnat et al., 2010; Lim and Lee, 2014]. La multiplicité de ces travaux tend à montrer que le monomythe est une structure narrative robuste, pouvant convenir à la plupart des besoins en représentation de scénarios.

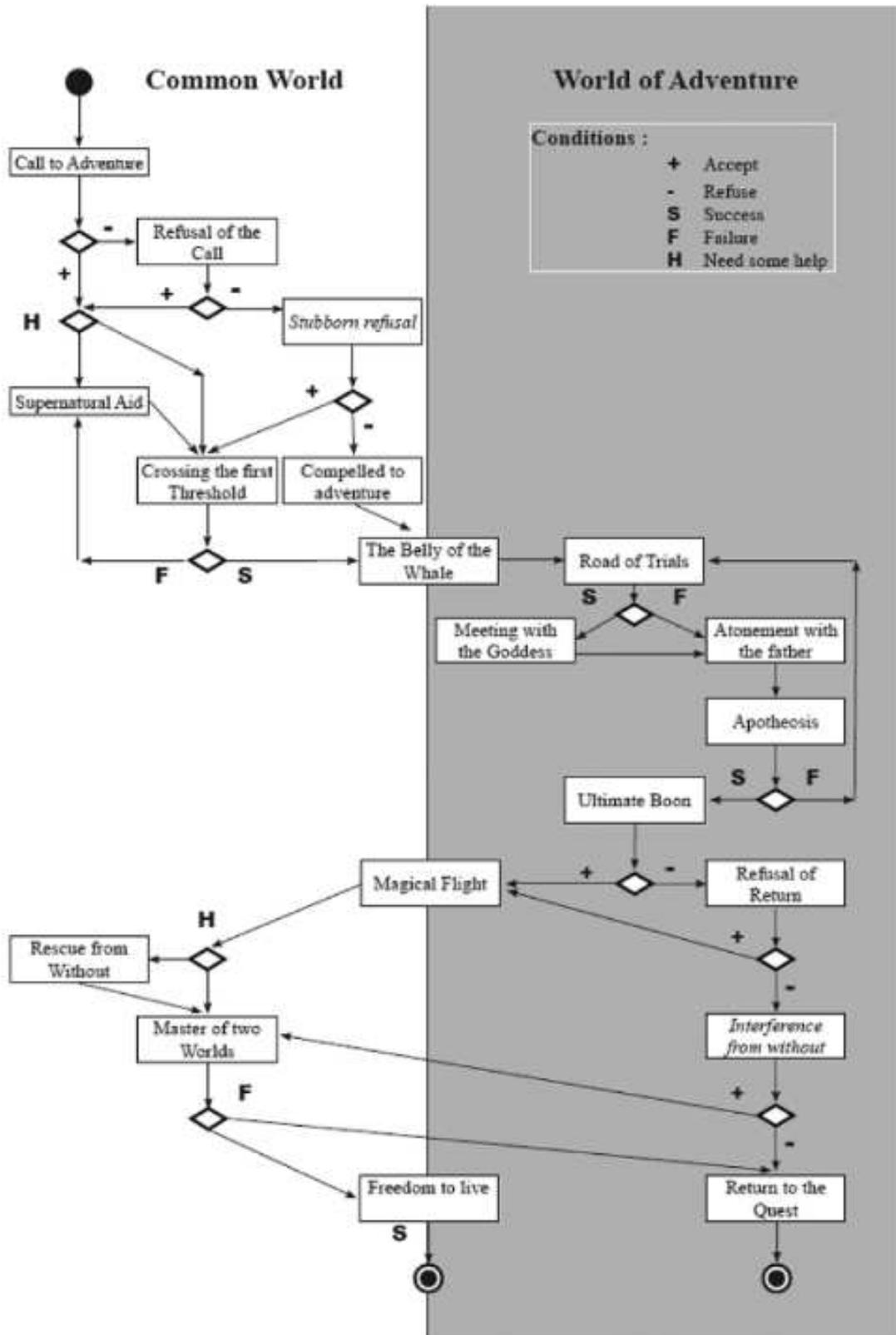


Figure 3.3 – Modèle de narration pour les jeux éducatifs s'appuyant sur le monomythe [Champagnat et al., 2010]

Nous pourrions être tenté d'en conclure que l'utilisation du monomythe, de par sa robustesse et son large emploi dans les domaines scientifiques, est

tout indiquée. Cependant, il apparaît que cette structure n'est pas adaptée à notre cadre d'application.

En effet, la mise en place d'un échec obligatoire dans le cadre de la narration pose un problème dans le cadre des entraînements dans le domaine militaire. L'échec total n'est pas un élément scénaristique qu'il est souhaité de montrer dans le cadre des tâches impliquant des sauvetages de blessés. Ainsi, l'étape de l'abysse ne peut pas avoir lieu, alors que c'est une étape clé pour l'apprentissage dans le cadre du monomythe.

De plus, nous pensons que le monomythe dans son objectif de servir de structure universelle devient une structure trop peu précise, ne fournissant pas de règles de construction claires.

De ce fait, nous avons étudié d'autres structures narratives plus précises dans leur construction, et présentant des possibilités intéressantes pour la scénarisation d'un EVAH.

### **3.2.2 Modèle épiphanique**

La narration à structure épiphanique [Koenitz et al., 2018] est une structure narrative communément utilisée au cinéma, ou encore dans des oeuvres interactives comme le jeu vidéo.

À un instant  $T$  d'un récit utilisant cette structure, des révélations vont permettre au spectateur de recontextualiser l'ensemble des événements qui se sont produits. Cela peut même l'amener à changer son point de vue sur l'ensemble de l'histoire ou lui faire comprendre des éléments passés qu'il n'aurait pu comprendre sans cette « épiphanie ».

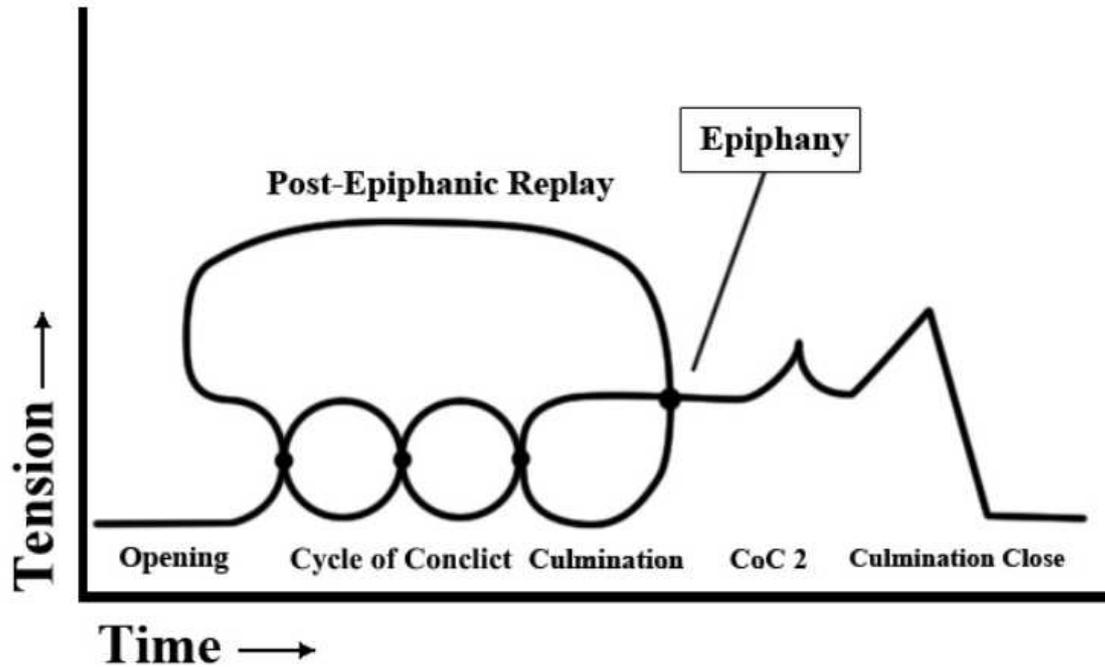


Figure 3.4 – Schématisation de la narration épiphannique [Koenitz et al., 2018]

Dans le cadre d'un entraînement, ce type de narration peut permettre par exemple de rejouer une scène suivant plusieurs points de vue, ou encore en apportant des connaissances sur un élément que l'apprenant n'aurait pas initialement pris en compte. Cela permet de varier également la tension narrative au cours de l'entraînement, afin de créer des moments plus calme dans le but de ne pas créer de surcharge cognitive chez l'apprenant.

### 3.2.3 Contes du Gange

Les contes du Gange [Koenitz et al., 2018] est une structure narrative prenant source dans les bandes dessinées *Amar Chitra Katha* retraçant l'histoire des mythes et légendes d'Inde.

La structure est agencée de manière à ce que la résolution d'une problématique initiale par le héros entraîne de nouvelles complications. Le héros est ainsi à la fois protagoniste de l'histoire, mais aussi antagoniste, car ses choix et ses actions entraînent de nouvelles situations problématiques. La fin d'une narration utilisant les contes du Gange est caractérisée par la prise de conscience du héros de son parcours initiatique, ainsi que la résolution finale d'une problématique n'apportant plus aucune complication.

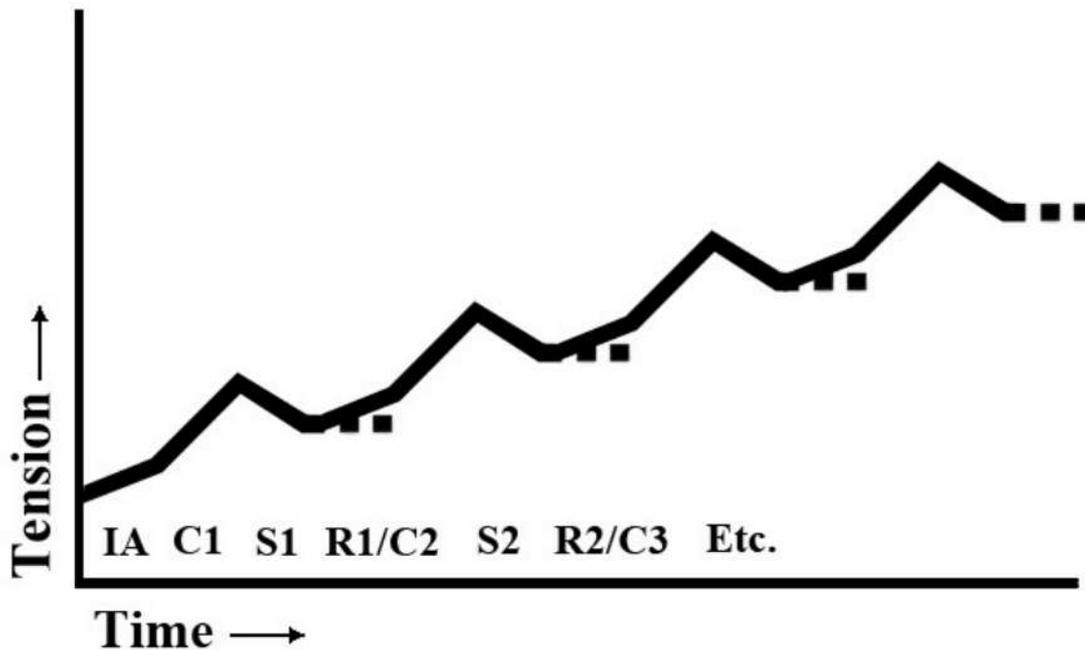


Figure 3.5 – Schématisation des contes du Gange [Koenitz et al., 2018]

Cet enchaînement dans cette structure nous paraît particulièrement intéressant, car il correspond aux enchaînements des événements que l'on retrouve lors des opérations en situation de crise. De plus, cette structure est très intéressante à utiliser dans le cadre d'une scénarisation, soutenue par l'idée que les choix des joueurs influent directement sur les problématiques qu'ils rencontreront plus tard dans le récit [Koenitz et al., 2018]. Les scénarios doivent alors être générés dynamiquement. Le système doit alors être capable de générer une multitude d'histoires en fonction des différents choix des joueurs.

D'autres théories narratives ont été étudiées dans le cadre de notre analyse de la littérature. Cependant, l'absence de travaux concrets utilisant ces théories, ou encore la trop grande difficulté à adapter ces théories nous ont amené à les écarter.

Nous avons finalement sélectionné les contes du Gange pour la structure narrative qui servira de modèle pour nos scénarios. Bien que la structure du modèle épiphanique nous semble intéressante également, la structure des contes du Gange nous paraît plus proche des situations que nous souhaitons mettre en place.

## 3.3 Scénarisation dans les environnements interactifs

### 3.3.1 Narration interactive

Tout d'abord, il est important de définir la notion de narration interactive.

**Narration interactive [Riedl and Bulitko, 2012; Edward et al., 2009]**

Forme de divertissement numérique dans lequel les utilisateurs créent ou influencent un scénario au travers d'actions, soit en assumant le rôle d'un personnage dans un monde virtuel fictif, soit en émettant des commandes à des personnages virtuels, parfois même autonomes.

Cette définition nous permet de voir qu'il existe plusieurs grandes approches dans le domaine de la narration interactive. En matière de scénario, deux mouvements s'opposent, l'approche orientée scénario et l'approche orientée personnage. La première approche a pour but de placer l'intention de l'auteur au centre de la narration. Dans ce type de narration, l'entièreté du scénario est généralement supervisée par un système central, qui aura pour but de s'assurer du bon déroulement [Szilas and Richle, 2013]. Les personnages virtuels dans cette approche servent le scénario, et sont directement pilotés par le système de scénarisation, bien que certains puissent agir d'eux-mêmes (on parle alors de personnage semi-autonome). Ils n'ont pas de volonté propre, au contraire des personnages virtuels que l'on retrouve dans l'approche orientée personnage. Dans cette approche les personnages ont leurs propres objectifs, leurs comportements, et ne sont pas pilotés par un système : ils sont autonomes. Le scénario n'est pas prescrit, il découle des actions des personnages [Aylett et al., 2005].

Ces deux approches ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. L'approche orientée personnage va permettre une très grande diversité de scénario au détriment du contrôle du récit ([Cavazza et al., 2002] ), tandis que l'approche orientée scénario va permettre un très fort contrôle sur le récit, mais aussi d'autres paramètres comme le suspense ([Cheong and Young, 2015] ), mais peut entraîner des pertes de cohérence dans le comportement des personnages ([Porteous, 2016] ). On peut aussi observer l'apparition d'une troisième approche nommée hybride [Magerko, 2005], qui est au croisement des deux autres approches, gardant les mêmes avantages et inconvénients.

Grâce à l'étude de ces approches, nous pouvons également mettre en avant deux procédés concernant la génération de scénarios, les scénarios scriptés et les scénarios générés dynamiquement. Tandis que les premiers sont exclusivement le fruit du travail d'un auteur, les seconds sont issus de

systèmes qui ont pour but d’alléger le travail de l’auteur. Le scénario est alors soit généré en amont de la simulation, soit pendant celle-ci.

Cependant, toutes ces approches sont soumises à une difficulté inhérente à la liberté offerte à l’utilisateur au travers de l’interactivité sur le scénario. En effet, l’utilisateur pourrait, intentionnellement ou non, amener le scénario à un état dans lequel celui-ci ne pourrait pas se conclure de par les actions qu’il pourrait effectuer, comme par exemple dans un environnement virtuel. C’est d’autant plus le cas dans les oeuvres utilisant une approche orientée scénario dans lesquelles le scénario est généré dynamiquement, l’auteur n’ayant pas supervisé l’ensemble du travail d’écriture. On parle alors de paradoxe narratif [Aylett, 1999] : le scénario prescrit peut être mis à mal par les actions de l’utilisateur qui peuvent aller à l’encontre de ce récit. Le scénario effectif peut alors fortement diverger du scénario prescrit et il n’y a aucune garantie que le message du scénario prescrit soit véhiculé par le scénario effectif. Bien qu’il soit possible de corriger un scénario en échec en redéfinissant par exemple un nouveau scénario à partir de l’état actuel de la simulation, cette correction se fait au prix d’opérations calculatoires coûteuses en temps.

### **3.3.2 Scénarisation d’environnements virtuels pour l’apprentissage ou l’entraînement en situation de crise**

Afin de comprendre les différents enjeux et le cadre d’application de la scénarisation pour l’apprentissage, nous avons étudié plusieurs exemples d’environnements virtuels pour l’apprentissage ou l’entraînement en situation de crise.

Bien que notre cas d’étude concerne l’entraînement plutôt que l’apprentissage, cette étude nous permet de mettre en valeur les approches qui nous semblent les plus prometteuses, tout en mettant en exergue les différents points essentiels à la mise en place de tels environnements [Feng et al., 2018; Radianti et al., 2020; Checa and Bustillo, 2020] et la difficulté à allier contrôle, cohérence et adaptabilité [Barot, 2014].

[Ronchi et al., 2016; Cosma et al., 2016] proposent deux environnements virtuels pour l’évacuation de tunnel dans le cadre d’incendie. Dans ces deux approches, la narration est dictée par un scénario que l’apprenant doit suivre. Ces deux exemples sont intéressants car, bien que l’objectif soit le même et que l’approche narrative utilisée soit commune, les deux approches appliquent le concept d’approche orientée scénario de manière différente. [Cosma et al., 2016] proposent un scénario sous forme d’ordres que l’apprenant doit exécuter. Le scénario est ainsi représenté par une succession d’ordres et de tâches, bien que l’apprenant soit libre d’explorer l’environnement. [Radianti et al., 2020] classifient cette approche comme étant dirigée par les instructions : le comportement de l’apprenant est guidé par des instructions claires et précises qui lui sont données en tant qu’éléments extra-

diégétiques, c'est-à-dire en dehors de la diégèse du scénario et donc de la narration. [Ronchi et al., 2016] proposent une autre méthode pour l'application d'une approche orientée scénario. Dans leur propre scénario d'évacuation de tunnel lors d'un incendie, l'ensemble des tâches de l'apprenant n'est pas explicité. Le comportement de l'apprenant est guidé grâce à des éléments diégétiques à la scène, et donc à la narration. [Radianti et al., 2020] classifient cette méthode comme dirigée par l'environnement.

Dans [Ronchi et al., 2016], l'environnement est réduit afin de réduire la phase d'exploration de l'apprenant. L'environnement est alors décrit comme un couloir, où la liberté du joueur est moins importante. Les zones restreintes sont matérialisées par des obstacles fixes infranchissables par l'apprenant, mais qui sont intégrés à la diégèse. Ainsi, l'approche se veut plus fidèle à la réalité grâce à la narration, bien que l'espace où l'apprenant évolue soit restreint, voire très restreint dans d'autres contextes d'application [Duarte et al., 2014]. Cependant, les différentes étapes du scénario ne sont pas explicitées, et l'apprenant doit lui-même découvrir les différentes étapes clés afin d'avancer dans le scénario en effectuant certaines actions spécifiques qu'il doit découvrir.

Ces deux méthodes sont intéressantes car elles illustrent parfaitement deux facettes d'une même approche. [Ronchi et al., 2016] mettent en avant un scénario contrôlé dont la liberté du joueur est très restreinte, mais dont tous les éléments de sa résolution se déroulent de manière diégétique. Au contraire, [Cosma et al., 2016] permettent un monde plus ouvert à l'exploration, mais où l'ensemble des tâches est explicité, afin que le joueur ne se perde pas dans ses objectifs tout en lui indiquant une zone clé à explorer.

Dans les deux cas, la narration ne suit pas une théorie narrative et ne consiste qu'en une suite logique d'actions. Ces deux approches ne cherchent pas à retenir l'attention de l'apprenant et n'étudient pas la manière dont ils mettent en place la pédagogie.

Dans [Li et al., 2017], pour retenir l'attention de l'apprenant et susciter un intérêt pour la formation, ils emploient une méthode d'apprentissage sous forme de jeu avec un système de notation (*scoring*), où l'objectif est d'obtenir le meilleur résultat à la fin. Le score est ainsi calculé en fonction des actions correctes de l'apprenant dans un environnement dédié à la formation sur les gestes de sécurité en cas de tremblement de terre. Ces bons gestes sont également suggérés par l'environnement grâce à des événements dynamiques particuliers entraînant des effets visuels que le joueur peut observer s'il a mal agi. Par exemple, la chute d'objets tranchants est simulée pour sensibiliser l'apprenant à ce risque, et elle se traduit par des blessures sur la représentation virtuelle de l'apprenant. En général, la présence de *feedbacks* est importante pour l'apprentissage. Dans [Bouchard et al., 2012], ils utilisent également des *biofeedbacks* pour former le personnel militaire à la gestion du stress lors de prises d'otages, en matérialisant les battements du cœur par un filtre rouge obstruant la vision de l'apprenant. Ainsi, l'apprenant doit réguler son rythme cardiaque grâce à des exercices de respiration pour réussir à voir

correctement la scène et atteindre ses objectifs.

Cependant, bien qu'aidant à la pédagogie, ces deux méthodes influencent ce que l'on appelle l'Affichage Tête Haute (ATH) de l'apprenant en fournissant des données calculées et informatives sur l'état de l'apprenant ou du scénario dans son champ de vision. Ainsi, tout comme la méthode de scénarisation s'appuyant sur des tâches explicites, ces méthodes sont un frein au réalisme qu'il est intéressant de mettre en place. Cependant, il est à noter que ces éléments pourraient être intégrés à la diégèse, par exemple en proposant un objet consultable dans l'environnement virtuel à cet effet, comme l'affichage sur le cadran d'une montre au poignet de l'avatar de l'apprenant, renforçant le sentiment d'appartenance à la scène. Nous pensons donc qu'il est important de limiter tout contact de l'apprenant avec le réel afin de lui faire oublier toute notion de contrainte de l'entraînement exprimée de manière extra-diégétique.

Une autre possibilité pour exprimer des contraintes sans pour autant avoir recours à des éléments sortant de la diégèse est par le biais de l'ensemble des personnages non-jouables.

Les personnages non-jouables sont l'ensemble des personnages virtuels de l'environnement qui ne sont pas contrôlables par l'apprenant, qu'ils soient autonomes ou non. Bien que ces personnages puissent servir uniquement de décor [Chittaro and Buttussi, 2015], les personnages non-jouables peuvent servir de support au scénario. Ils peuvent être utilisés notamment pour aider le joueur par le biais de dialogues. [Prachyabrued et al., 2019] montrent cette importance des dialogues avec les personnages dans le cadre d'un environnement virtuel pour l'entraînement du personnel ambulancier. La présence d'un dialogue avec un des personnages virtuels avaient tendance à présenter des niveaux de stress plus élevés et une présence comportementale plus marquée que les utilisateurs s'engageant dans la même histoire mais sans cet élément. [Kinatader et al., 2014] utilisent les personnages afin de créer des situations d'apprentissage en contrôlant le comportement des personnages et en les poussant à faire de mauvaises actions dans le cadre d'un environnement dédié à l'évacuation, en sélectionnant la mauvaise sortie par exemple. Cette approche a alors pour but de mettre l'apprenant en échec en le poussant, par mimétisme, à copier les personnages. Cependant, nous pensons que la mise en échec de l'apprenant n'est pas bénéfique lors de l'entraînement aux situations de crise. Malgré cela, nous pensons que cette utilisation des personnages est judicieuse afin de donner des informations à l'apprenant, voire même d'utiliser les personnages comme moteur d'intrigue, par exemple en leur faisant commettre des fautes que l'apprenant doit remarquer, qu'ils soient utilisés dans une approche orientée scénario ou de par leur propre fait dans le cadre d'une scénarisation orientée personnage et selon leur propre modèle cognitif [de Blauwe et al., 2022].

## **Deuxième partie**

### **Contributions**

Notre problématique porte sur deux éléments distincts : le suivi de l'évolution des capacités de l'apprenant à gérer son stress, et l'utilisation de ce suivi afin de générer dynamiquement des scénarios d'entraînement à la gestion du stress compatibles avec ses capacités. Nous nous intéressons plus particulièrement au contexte des situations de crise dans lesquelles la variabilité des situations à représenter est importante et où chaque choix des opérateurs peut mener à de lourdes conséquences sur le terrain.

Dans un premier temps, l'état de l'art que nous avons réalisé nous a permis à la fois de comprendre les différents éléments sur lesquels le stress humain influe, mais aussi les différentes méthodes nous permettant de le définir et de le catégoriser. Grâce à cette étude, nous avons pu également comparer des méthodes permettant de représenter mathématiquement les compétences ainsi que les éléments incertains dans la réalisation du profil, et ce au travers de plusieurs profils de l'apprenant existants.

Plus particulièrement, nous avons mis en exergue l'importance de la prise en compte des **incertitudes** dans la création et le développement du profil à cause de la nature même du stress et de la difficulté à trancher sur l'état de stress d'une personne ou sur l'impact d'un stresser sur son état.

Dans un second temps, nous avons également étudié les différentes méthodes de génération dynamique de scénario. Nous avons particulièrement mis en exergue la difficulté du maintien de la balance entre libre action du joueur et bon déroulement du scénario afin de maintenir un certain contrôle pédagogique, et cela en proposant une génération dynamique des différents scénarios. Nous avons également pu étudier différents patterns narratifs, utilisés dans le but de maintenir une **cohésion narrative** importante et d'assurer une grande qualité des scénarios générés dans un contexte de représentation de situations de crise, mais aussi dans le but de maintenir l'intérêt de l'apprenant pour l'entraînement qui lui est proposé.

La première partie concernera la présentation générale de notre approche en deux modules que nous avons développés ainsi que leur utilisation conjointe. Nous présenterons ensuite plus précisément le profil du stress de l'apprenant aux travers de ses composantes majeures et de son utilisation. Nous présenterons enfin le second module destiné à la scénarisation dynamique d'entraînement à la gestion du stress.

---

<b>4 Profil dynamique du stress de l'apprenant</b>	<b>50</b>
4.1 Conception du profil . . . . .	50
4.1.1 Observables et capteurs . . . . .	51
4.1.2 Incertitudes . . . . .	54
4.1.3 Représentation des stresser . . . . .	56
4.2 Création du profil . . . . .	59
4.2.1 Domaine d'entraînement . . . . .	59

---

4.2.2	Représentation spatiale . . . . .	61
4.2.3	Masses de croyance . . . . .	66
4.3	Fonctionnement du profil . . . . .	69
4.3.1	Fusion de croyances de sources simultanées . . . . .	70
4.3.2	Fusion de croyances lors d'une propagation . . . . .	74
4.3.3	Révision . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Moteur de scénarisation dynamique d'entraînement à la gestion du stress</b>	<b>77</b>
5.1	Une scénarisation pour les situations de crise . . . . .	77
5.1.1	Théorie narrative des contes du Gange . . . . .	77
5.1.2	Une approche semi-scriptée . . . . .	79
5.2	Éléments de description du scénario . . . . .	80
5.2.1	Nœud . . . . .	81
5.2.2	Fragment . . . . .	82
5.2.3	Segment . . . . .	83
5.3	Création du scénario . . . . .	83
5.3.1	Sélection des classes de situations . . . . .	84
5.3.2	Création des segments narratifs . . . . .	87
5.3.3	Assemblage des segments narratifs . . . . .	92
5.4	Utilisation du scénario . . . . .	94
5.4.1	Modification dynamique du scénario . . . . .	95
5.4.2	Mise à jour du profil de l'apprenant . . . . .	99

---

## Approche générale

Notre approche a donné lieu au développement de deux modules bien distincts, mais dont l'utilisation est conjointe. Plus précisément, nous avons développé le profil du stress de l'apprenant et le module de scénarisation dynamique de manière à ce qu'ils puissent évoluer conjointement, bien que nous ayons pris en compte la possibilité de pouvoir les utiliser de manière autonome. Chaque module est en charge d'une partie des tâches permettant de répondre à nos objectifs.

Le profil du stress de l'apprenant est en charge de :

- Créer les différentes croyances qui portent sur l'état d'acquisition des compétences de l'apprenant à partir des observables de l'environnement virtuel et des différentes analyses des capteurs utilisé pour détecter le stress ;
- Rendre une visualisation graphique des compétences de l'apprenant à gérer son stress ;

- Détecter les possibles contradictions du profil ;
- Sélectionner les différentes compétences et les différents stressseurs à travailler lors des prochaines situations d’entraînement.

Quant au modèle de scénarisation dynamique, il est en charge de :

- Générer un scénario à partir des différentes situations d’entraînement fournies ;
- Intégrer les différentes situations selon un schéma narratif particulier ;
- Ajouter des éléments de scénarisation et de narration pour maintenir une cohésion narrative importante.

Le schéma suivant (Figure 3.6) résume les différentes interactions entre les deux modèles, ainsi que leur fonctionnement au travers des sessions d’entraînement que nous détaillerons dans les Sections 4 p.50 et 5 p.77.

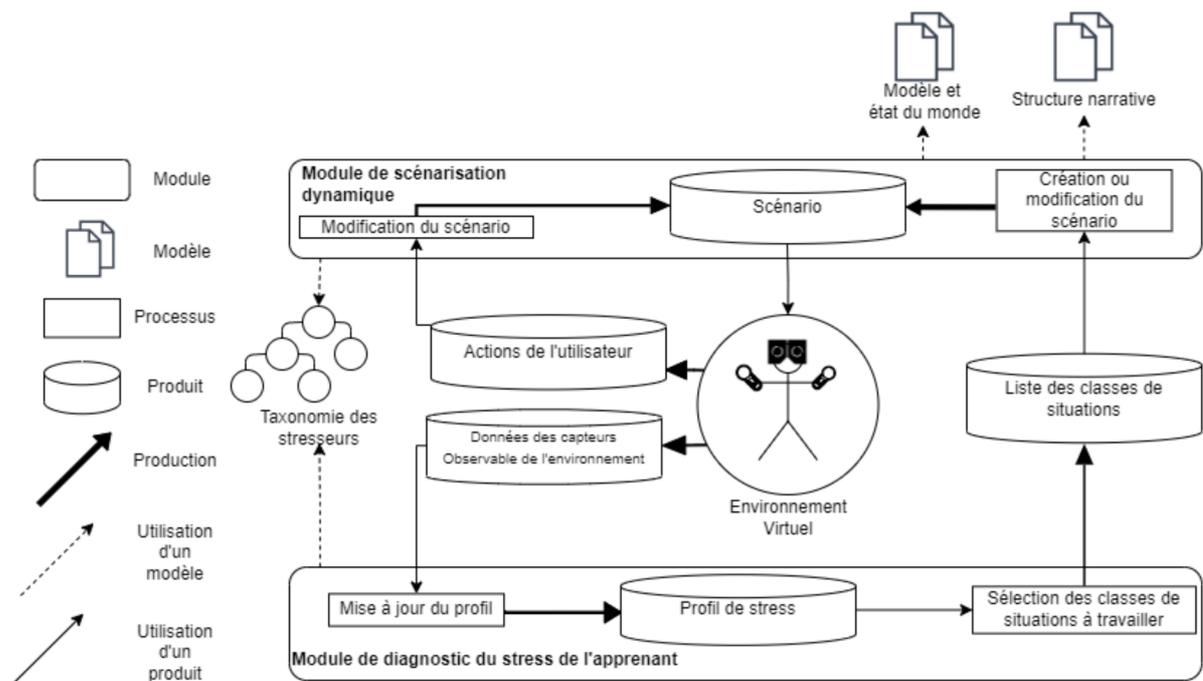


Figure 3.6 – Schéma de l’approche générale et de la communication entre le modèle du profil de stress et de scénarisation dynamique

Bien que notre contexte d’étude soit la génération d’entraînement en situation de crise, nous avons également veillé à ce que ces modules soient le plus possible réutilisables. Ainsi, nous avons travaillé à les affranchir de cette contrainte en proposant des méthodes de génération n’utilisant pas spécifiquement le contexte. Pour cela, nous avons fait le choix d’utiliser plusieurs structures qu’il est possible de modifier ou de changer selon le cadre d’application.

# Chapitre 4

## Profil dynamique du stress de l'apprenant

Dans ce chapitre, nous allons présenter le framework permettant de créer un profil dynamique du stress d'une personne. Plus précisément, nous allons détailler les différents choix que nous avons faits et les modèles que nous avons conçus pour répondre à la fois à nos objectifs et aux différentes contraintes que nous devons prendre en compte.

### 4.1 Conception du profil

Comme étudié dans l'état de l'art, la conception et la mise en place d'un profil apprenant sont des sujets sur lesquels portent beaucoup de travaux, issus de plusieurs communautés.

Dans le cadre de l'entraînement aux situations de crise, nous avons fait le choix de nous rapprocher du paradigme d'apprentissage du courant constructiviste. Plus précisément, nous avons choisi de réutiliser les travaux de Carpentier [Carpentier and Lourdeaux, 2013] sur le développement d'un modèle computationnel de la Zone Proximale de Développement ou ZPD de Vygotsky [Vygotsky, 1980].

Cette approche nommée **espace-zpd** est centrée sur la modélisation d'un profil utilisant un ensemble de situations d'apprentissage mettant en jeu des connaissances particulières. Ainsi, le profil ne spécifie pas que l'apprenant maîtrise ou non une compétence, mais qu'il semble maîtriser ou non des situations caractérisées de "mal-définies" et qui mettent en jeu cette compétence de manière plus ou moins centrale et qui sont plus ou moins difficiles.

Dans le cadre de notre approche, nous voulons pouvoir à la fois représenter dans les situations d'apprentissage des compétences, techniques ou non-techniques, ainsi que la présence d'éléments déclenchant du stress. Plus précisément, notre profil du stress permet de représenter l'ensemble des situations de crise où l'apprenant sait appliquer une compétence technique ou

non-technique tout en gérant le stress provoqué par un élément déclencheur externe.

Cependant, nous ne pouvons pas réutiliser tel que décrit dans les travaux de Carpentier le concept d'espace-zpd sans lui apporter des modifications. En effet, la description d'une situation stressante et la création d'un profil de stress différent en partie à cause de la nature même des stressseurs et de la difficulté à définir les effets de ces stressseurs sur l'apprenant.

À partir de l'espace-zpd de Carpentier, nous allons donc devoir agir à plusieurs niveaux afin de pouvoir décrire des situations de crise. Plus précisément, nous allons apporter des modifications aux représentations des situations et à la gestion des incertitudes, tout en ajoutant des éléments permettant de travailler à différents niveaux de situations de crise.

Nous aborderons tout d'abord la conception du profil au travers de la présentation des données que nous utilisons et des différentes représentations qui sont liées. Nous présenterons dans une seconde section la mise en place du profil et sa création. Nous aborderons également les différents éléments permettant la mise à jour du profil lors de son utilisation. Nous concluons sur la place du profil au sein du framework et nous présenterons son utilisation conjointe avec le moteur de scénarisation.

### 4.1.1 Observables et capteurs

Au sein de notre version de l'espace-zpd, nous voulons rendre compte des capacités de l'apprenant à ne pas être influencé par des stressseurs dans un contexte où il doit effectuer des tâches métier.

L'objectif de l'apprenant au travers de ces entraînements est de réussir les tâches métiers confiées sans erreur tout en réussissant à maintenir un niveau de stress faible lorsque les éléments stressants sont déclenchés.

Afin d'évaluer cette capacité, nous définissons des observables qui sont créés au sein de l'environnement virtuel.

#### Observable

Élément de l'environnement virtuel donnant une information sur l'état du monde, le déclenchement d'un évènement particulier ou une donnée créée suite aux actions de l'apprenant.

Un observable permet de juger de la capacité de l'apprenant à gérer son stress lorsque celui-ci réalise une action mettant en jeu une compétence donnée de différentes manières selon son type :

- Un observable sur l'état du monde permet de définir si l'apprenant a correctement effectué une tâche particulière sur la durée (Exemple : gestion de stock réduit, tri de blessés lors de vagues successives) ;

- Un observable sur le déclenchement d'un évènement permet de définir si l'apprenant a correctement effectué une tâche nécessitant une action immédiate (Exemple : administration d'un premier soin à un blessé souffrant, demande d'évacuation) ;
- Un observable calculé sur une donnée métrique permet d'attester du résultat de l'apprenant sur une tâche particulière (Exemple : nombre d'erreurs, temps mis pour effectuer une action particulière).

La définition d'observables n'étant pas au coeur de notre recherche, nous avons utilisé une définition simple, centrée sur les actions de l'apprenant, pour ceux que nous utilisons. Cependant, ces observables ne permettent pas de juger de la capacité de l'apprenant à gérer son stress si celui-ci subit un effet tunnel sur la tâche, en oubliant l'ensemble de l'environnement qui l'entoure. Ainsi, l'intégration d'autres modèles [El-Kechai, 2007; Bourrier, 2019] pourrait permettre une définition plus complète de ces observables et de pallier ce problème.

Les observables permettent ainsi de juger de l'efficacité de l'apprenant au travers de sa rapidité d'exécution et de ses choix lorsque celui-ci est mis sous la pression d'éléments stressants. Ces observables ont notamment été utilisés dans l'expérimentation qui sera détaillée dans la partie 7.1 de ce mémoire.

Le principal inconvénient de ces observables est qu'ils ne permettent pas de définir seuls l'état de stress de l'apprenant, mais seulement de mesurer les effets présumés du stress sur les capacités décisionnelles et opérationnelles de l'apprenant.

Afin d'établir le profil, le système a également besoin d'une source d'information sur les réactions physiologiques de l'utilisateur lorsque celui-ci est soumis à un stresseur. Il existe de nombreux signaux analysables. Cependant, le système doit répondre à des contraintes fortes en terme de vitesse d'exécution, et doit opérer l'ensemble de ses actions en moins d'une seconde, valeur correspondant au temps interactif. Nous devons également exclure les capteurs qui seraient difficilement utilisables avec un casque de réalité virtuelle.

Le profil du stress reçoit en paramètre les résultats de l'analyse des signaux physiologiques mesurés par ces capteurs physiologiques selon une catégorisation. Cette catégorisation est faite selon une étude analytique à partir de plusieurs caractéristiques des signaux. Elle comprend quatre niveaux, représentant l'état de stress de l'apprenant :

- Non stressé ;
- Stress faible ;
- Stress moyen ;
- Stress intense.

Le choix a été fait de ne pas réaliser l'analyse des signaux physiologiques au sein du module du profil de l'apprenant. Ainsi, le profil ne reçoit en para-

mètre qu'une interprétation des signaux réalisée par un programme tiers. La raison de ce choix est de réduire au maximum les différentes dépendances du module, afin de le réutiliser dans d'autres contextes. Nous assurons la possibilité de réutiliser le profil dans des contextes permettant d'utiliser des capteurs différents ou plus nombreux.

L'analyse des signaux physiologiques est également une question de recherche encore ouverte. Il est, à ce jour, encore très difficile de trancher sur l'état de stress d'une personne, tant les variations sont nombreuses entre chaque individu [Benchekroun et al., 2022].

Dans le cadre de nos travaux, nous avons eu recours à deux types de mesures afin de déterminer le niveau de stress de l'apprenant. Ils nous permettent d'obtenir respectivement des informations sur l'activité électrodermale (EDA) et sur l'activité électrique du cœur (ECG) (Figure 7.2) [Schmidt et al., 2018], tous deux variants lors de l'exposition à un stresser et régis par le système nerveux sympathique. L'analyse de la variation du potentiel électrique, de la résistance électrique ainsi que de la variabilité de la fréquence cardiaque nous permettent dès lors de quantifier pour un individu la façon dont son corps va répondre à un élément stressant. Nous considérons que moins la réponse au stimulus est importante et lente, plus l'apprenant a réussi à faire face à la situation stressante.

Les signaux issus de l'analyse des EDA et des ECG peuvent être parasités par d'autres stimuli que des stresser. Par exemple, l'activité physique du corps entraîne une hausse de l'activité cardiaque et électrodermale. Le phénomène du mal du simulateur, trouble se manifestant lors d'une situation présentant une discordance entre le système vestibulaire et la perception visuelle, peut également agir sur les signaux que nous analysons. Ces problèmes, très fréquents lors de l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle, créent de l'incertitude dans nos mesures. De plus, les capteurs peuvent produire des erreurs de mesure, selon un taux d'erreur que nous devons prendre en compte. C'est pourquoi nous avons recours à la fusion de données multi-capteurs afin d'améliorer la fiabilité de nos données.

D'autres problèmes peuvent se poser lors du diagnostic de l'apprenant au cours du temps et des différents entraînements auxquels il prend part. Il est notamment possible que les analyses de données soient totalement contradictoires entre plusieurs entraînements. Il est également possible que l'analyse des données soit différentes entre deux entraînements présentant un scénario identique. La mesure en temps interactif du stress est encore à ce jour un problème de recherche. Chaque personne ayant des signaux physiologiques différents, il n'existe pas de seuil universel permettant de définir l'état de stress. La durée de réponse à un stimulus est également variable entre les personnes, et le temps pour retrouver un niveau basal dans les signaux que nous analysons peut être assez long. Toutes ces contraintes apportent de l'incertitude supplémentaire à nos mesures.

Pour prendre en compte ces problèmes lors de notre diagnostic, nous

devons utiliser un modèle probabiliste permettant de caractériser la connaissance issue de l'analyse des données en provenance de plusieurs sources d'informations, tout en permettant de matérialiser des incertitudes ainsi que des contradictions et un manque éventuel d'information.

### 4.1.2 Incertitudes

La création d'un profil de l'apprenant de manière informatique soulève plusieurs problèmes. Du fait que le profil s'appuie sur des données issues de capteurs et de la difficulté à mesurer précisément l'état de stress d'une personne, de manière informatisée et automatique, beaucoup d'imprécisions et d'incertitudes doivent être prises en compte dans le diagnostic de l'état de la compétence de l'apprenant à gérer son stress. De plus, des contradictions lors de l'élaboration du profil peuvent émerger, par exemple entre deux sessions où l'apprenant aurait eu des résultats totalement différents.

Plus précisément, nous avons besoin de pouvoir représenter ces différents états sur une connaissance d'une situation d'apprentissage du profil :

- Imprécision : état de la connaissance dans laquelle celle-ci repose sur un intervalle de données ;
- Incertitude : état de la connaissance dans laquelle celle-ci repose sur une donnée imprévisible ;
- Ambiguïté : état de la connaissance dans laquelle celle-ci repose sur une donnée équivoque ;
- Ignorance : état de la connaissance dans laquelle celle-ci repose sur une donnée incomplète ou entièrement indisponible ;
- Contradiction : état de la connaissance dans laquelle celle-ci repose sur plusieurs données différentes et en contradiction les unes avec les autres.

Plusieurs modèles mathématiques permettant la représentation de l'imperfection des ces informations existent, certains étant même utilisés dans d'autres profils de l'apprenant. Nous avons exploré et envisagé l'utilisation des théories suivantes :

- Probabilités : théorie permettant de représenter l'incertitude aléatoire liée à la variabilité d'un phénomène selon une variable affectée d'une valeur à laquelle est associée une mesure de probabilité ;
- Ensembles : théorie permettant de représenter l'imprécision dans un jeu de données selon un intervalle de valeurs ;
- Ensembles flous [Zadeh, 1996] : théorie permettant de prendre en compte l'imprécision dans un jeu de données. Contrairement à la théorie des ensembles, l'appartenance d'un élément à l'ensemble n'est plus un booléen mais une valeur entre 0 et 1 ;

- Possibilités [Zadeh, 1996; Dubois and Prade, 2012] : théorie apportant la gestion de l'incertitude épistémique résultant d'un manque de croyance à la théorie des ensembles flous ;
- Réseaux bayésiens [Pearl, 2014] : théorie permettant de modéliser grâce à un graphe orienté acyclique probabiliste des connaissances sous forme de variables aléatoires. Les relations entre les variables ne sont pas déterministes mais probabilisées ;
- Fonctions de croyance [Shafer, 1976] : théorie permettant de représenter l'incertitude, l'ambiguïté et l'imprécision d'une donnée selon une distribution de masse de croyance sur toutes les hypothèses possibles ;
- Croyances transférables [Smets and Kennes, 1994] : théorie permettant de représenter la connaissance d'une variable par la fusion d'informations provenant de plusieurs sources représentées par des distributions de masses de croyance.

De cette étude des différentes possibilités s'offrant à nous découlent le tableau suivant, comparant qualitativement et ce sur plusieurs critères les sept théories que nous avons étudiées.

	Imprécision	Incertainité	Ambiguïté	Ignorance	Contradiction
Th. des ensembles	✓		✓		
Th. des probabilités		✓			
Th. des ensembles flous		✓	✓		
Th. des possibilités		✓	✓	✓	
Th. des réseaux bayésiens	✓	✓	✓	✓	✓
Th. des fonctions de croyances	✓	✓	✓	✓	✓
Th. des croyances transférables	✓	✓	✓	✓	✓

Figure 4.1 – Tableau récapitulatif de l'étude des différentes possibilités de représentation des théories mathématiques étudiées pour la représentation d'incertitude

Notre choix se porte tout naturellement entre les trois théories offrant le plus de possibilités de représentation, bien que nous aurions pu envisager l'utilisation d'une des autres théories au prix d'un travail de représentation bien plus important afin de satisfaire tous nos besoins.

Afin de faire notre sélection, nous avons étudié plusieurs profils apprenant utilisant ces trois théories restantes que sont la théorie des réseaux bayésiens, la théorie des fonctions de croyance et la théorie des croyances transférables.

Suite à notre étude, notre choix s'est porté sur la théorie des croyances transférables. Cette théorie, utilisant la théorie des fonctions de croyance, englobe l'ensemble des besoins en représentation de l'incertitude et de l'imprécision que nous avons énumérés, et permet également de représenter des conflits entre deux sources d'informations contradictoires, ainsi que le

manque de connaissance. Ce cadre formel propose également des outils afin de fusionner des informations de plusieurs sources, ainsi que des outils permettant d'effectuer des inférences sur les valeurs d'une variable présentant un manque de connaissance. Ces outils sont au coeur de notre contribution et nous permettent de mettre en place l'aspect dynamique de notre profil, tout en répondant à certaines des problématiques posées lors de son utilisation.

### 4.1.3 Représentation des stresseurs

En parallèle de la représentation des données issues des observables et des capteurs sous forme de masses de croyance, nous devons mettre en place une représentation des stresseurs ainsi qu'une représentation des compétences métier qui composeront les situations d'entraînement.

Plus particulièrement, nous voulons mettre en place une représentation qui va permettre d'inférer sur les capacités de l'apprenant à gérer son stress lorsqu'on le soumet à un stressor proche d'un autre stressor déjà étudié.

Pour définir un niveau de proximité entre les stressors, nous devons créer une catégorisation qui nous permettra de créer des liens sémantiques entre eux. L'utilisation d'une taxonomie est appropriée pour cette tâche.

Lors de notre étude des différentes méthodes de représentation des compétences de l'apprenant, nous avons également étudié les différents éléments à prendre en compte dans le cas d'étude particulier qu'est la représentation des compétences dans le cadre d'un entraînement.

Dans la littérature, il est usuel d'intégrer des notions de pré-requis entre les différentes compétences de l'apprenant dans la création d'un profil permettant de diagnostiquer l'apprentissage. Dans notre cadre particulier qu'est l'entraînement, l'apprentissage a déjà été effectué sur les différentes compétences métier. Le coeur de notre profil réside en la création d'un diagnostic sur l'entraînement à la gestion des différents éléments pouvant stresser une personne. Or, chaque personne est unique et ressent du stress en fonction de sa personnalité, de ses acquis et de son passé. De ce fait il n'existe pas de hiérarchisation précise des stressors, et aucun ne peut être qualifié de pré-requis d'un autre.

#### Exemple

Intuitivement, on peut penser que les cris d'un adulte sont moins stressants que les cris d'un enfant. Mais selon le contexte, cette supposition peut être altérée. Les cris d'un adulte pourraient chez un apprenant particulier lui rappeler un épisode traumatisant, engendrant chez lui un stress plus important.

Nous proposons alors l'utilisation d'un ordonnancement entre les stressors plutôt que la hiérarchisation usuelle sous forme de pré-requis.

En réutilisant la catégorisation de [Dougall and Baum, 2012], nous avons développé notre propre taxonomie s'appuyant sur un découpage sémantique des stressseurs que nous voulons pouvoir travailler dans l'environnement virtuel.

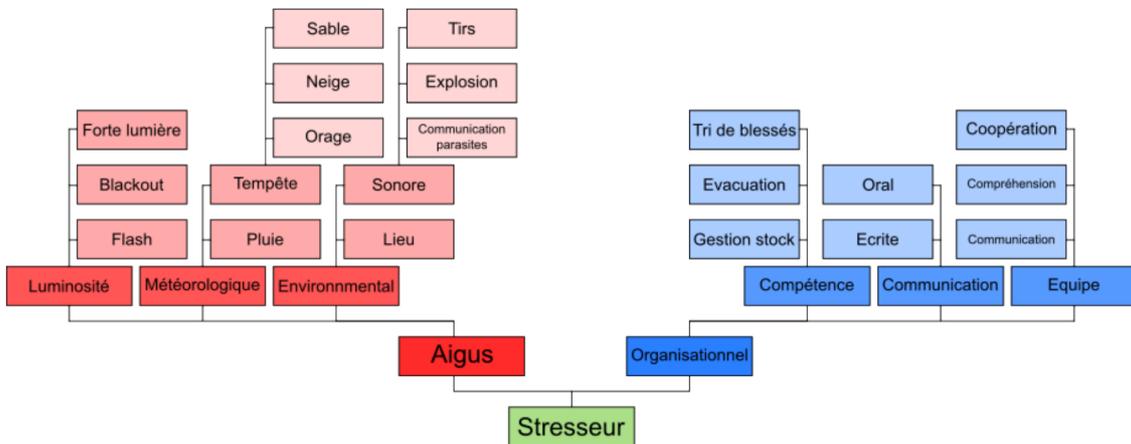


Figure 4.2 – Extrait de l'exemple de taxonomie utilisée dans le cadre d'application VICTEAMS

Dans le cadre de nos entraînements en réalité virtuelle, il serait très complexe de retranscrire un ensemble de stressseurs physiques et de les simuler afin d'affecter l'apprenant. Ainsi, nous avons fait le choix de ne créer qu'un ensemble de stressseurs psychologiques au sein de l'environnement virtuel. De plus, nous avons fait le choix de représenter deux sous-catégories de ces stressseurs psychologiques, à savoir les stressseurs aigus et les stressseurs organisationnels.

Les stressseurs organisationnels représentent l'ensemble des éléments stressants qui peuvent être liés à l'exécution d'une tâche métier spécifique ou de problèmes liés au domaine d'application de l'entraînement. Dans le cadre de VICTEAMS, les stressseurs organisationnels peuvent être :

- Des tâches métiers. *Exemple :*
  - *Demander une injection ;*
  - *Trier des patients.*
- Des évènements liés au cadre d'application. *Exemple :*
  - *Retard de l'hélicoptère d'évacuation ;*
  - *Stock de médicament épuisé.*
- Des changements d'état comportemental des personnages non-joueurs peuplant la scène. *Exemple :*
  - *Personnage désinvolte ;*
  - *Personnage faisant des erreurs dans les tâches confiées par le joueur.*

Les stressseurs aigus représentent l'ensemble des éléments stressants qui ne sont liés à aucun contexte particulier précis. Ce sont des stressseurs

très souvent éphémères et soudains, qui peuvent ne pas être directement liés au domaine d'application de l'entraînement. Dans le cadre de VICTEAMS, les stressseurs aigus peuvent être :

- Des sons. *Exemple :*
  - *Explosions ;*
  - *Bruits de tirs ;*
  - *Rire d'enfants.*
- Des effets visuels. *Exemple :*
  - *Black-out ;*
  - *Flash lumineux ;*
  - *Orage ;*
  - *Flaque de sang.*

La principale difficulté de l'utilisation d'une telle taxonomie est sa création. En plus d'être facilement utilisable, celle-ci doit répondre à des contraintes de construction particulières, car de sa construction dépend l'ensemble des mécanismes d'inférence que nous allons mettre en place. Cette construction est d'autant plus complexe qu'elle doit être comprise et réalisée par un expert ou par le formateur.

Nous proposons un ensemble de règles de construction permettant de réaliser la taxonomie. La construction de la taxonomie peut ainsi se faire en totale autonomie par les formateurs. De ce fait, cette structure peut être facilement adaptée à d'autres contextes, ou bien s'étoffer au cours du temps. Cette taxonomie est donc évolutive et réutilisable.

### Conception du profil - Résumé

Nous avons présenté l'ensemble des concepts et des éléments de description et de représentation que nous utiliserons afin de créer le profil du stress de l'apprenant.

Grâce à la théorie des masses de croyance transférables nous disposons d'un cadre mathématique précis nous permettant de représenter l'ensemble des états de connaissance que peut avoir le système sur la compétences de l'apprenant à gérer son stress lors des situations particulières d'entraînement qui pourront être générées dans l'environnement virtuel.

Cet état de connaissance est déterminé sur la base du croisement de plusieurs sources d'information. L'ensemble des capteurs physiologiques utilisés fournissent une approximation de l'état de stress de l'apprenant. Les différents observables de l'environnement permettent quant à eux de fournir des indications sur les choix de l'apprenant ainsi que sur ses erreurs et sa vitesse d'exécution.

Nous avons contruit une taxonomie des différents stressseurs de l'environnement, basée sur une catégorisation de la littérature, permettant de calculer une distance sémantique entre les différents nœuds qui la composent.

## 4.2 Création du profil

Nous nous intéressons à l'entraînement des compétences métier au travers de situations stressantes. Notre objectif principal est de proposer des scénarios d'entraînement personnalisés dans lesquels les situations d'entraînement mettent en jeu des compétences sous conditions de stress. Comme la capacité à gérer le stress est propre à chaque apprenant, notre second objectif est d'étendre progressivement la zone de développement du profil de chaque apprenant.

Au travers du profil dynamique du stress, nous souhaitons pouvoir rendre compte du niveau de développement présent des capacités d'un apprenant à faire face à des stressseurs, de son niveau de développement potentiel, mais également pouvoir conseiller au formateur de nouveaux stressseurs à travailler. Plus précisément, nous souhaitons pouvoir inférer l'état de la compétence de l'apprenant à gérer son stress sur l'ensemble de situations particulières données même si ce dernier ne s'est jamais exercé directement sur l'intégralité de l'ensemble.

De plus, nous voulons aussi laisser au formateur un certain contrôle sur le paramétrage des entraînements, ainsi que sur la visualisation du profil de l'apprenant. Notre second objectif est alors de proposer une représentation du diagnostic de l'apprenant à plusieurs niveaux de hiérarchisation des compétences. Nous nous appuyons pour cela sur la Zone Proximale de Développement (ZPD) de Vygostsky.

Afin de diagnostiquer l'état de stress de l'apprenant et de créer le profil, nous devons dans un premier temps définir l'ensemble représentant le domaine d'entraînement. Puis nous définirons l'ensemble des règles de diagnostic et d'évolution du profil qui formeront le modèle de décision.

### 4.2.1 Domaine d'entraînement

Dans le cadre du paradigme constructiviste qui nous sert de référence, le domaine d'entraînement est caractérisé par l'ensemble des situations d'entraînement à la gestion du stress qui le met en oeuvre.

### Situation d'entraînement à la gestion du stress

Description partielle du monde à un instant donné sous la forme d'un agrégat d'assertions, à l'intérieur de laquelle la qualité de la performance de l'apprenant doit fournir des informations interprétables sur son état de stress.

Cependant, la description de l'ensemble des situations impliquerait une modélisation de très grande envergure, nécessitant une manipulation d'un nombre de données important.

Nous nous sommes intéressés à la représentation du domaine de connaissance dans la création des espaces-zpd ([Carpentier and Lourdeaux, 2013]) sous forme de représentation abstraite.

### Classe de situations [Carpentier and Lourdeaux, 2013]

Représentation abstraite d'un ensemble de situations présentant des propriétés communes nommées descripteurs.

On associe à la classe de situations S le vecteur  $\sigma$  tel que :

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$$

avec  $\sigma_i$  la valeur correspondante au descripteur i.

Les classes de situations permettraient ainsi de représenter un ensemble important de situations sans pour autant devoir en spécifier l'ensemble, et par le moyen de l'utilisation de descripteurs permettant de définir les éléments variants entre chaque situation d'un même ensemble.

Dans notre cadre d'application, les variants correspondent aux différents éléments représentés dans la taxonomie :

- **Les compétences**, ou l'ensemble des savoir-faire que l'apprenant doit connaître pour la résolution d'une situation. *Exemple :*
  - *Trier des blessés ;*
  - *Demander une évacuation sanitaire.*
- **Les variables cognitives**, ou l'ensemble des variables de l'état du monde déterminant le déroulement d'une compétence. *Exemple :*
  - *Trier des enfants blessés, trier des militaires ennemis blessés ;*
  - *Demander une évacuation sanitaire en hélicoptère, demander une évacuation sanitaire en ambulance.*
- **Les stressseurs**, ou l'ensemble des événements déclenchant du stress chez l'apprenant. *Exemple :*
  - *Explosion ;*
  - *Cris de blessés.*
- **Les catégories de stressseurs**, ou l'ensemble des regroupements de stressseurs de la taxonomie ayant le même parent et étant de ce fait

proche sémantiquement. *Exemple :*

- *Stresseurs sonores ;*
- *Stresseurs météorologiques.*
- **Les difficultés**, ou l'ensemble des variables déterminant les différents éléments présents dans le déroulement d'un stresseur ou d'une compétence et influençant sur la difficulté théorique. *Exemple :*
  - *Explosion faible, explosion intense ;*
  - *Cris de blessé seul, cris de plusieurs blessés.*

Dans notre utilisation de l'espace-zpd dans la création du profil de l'apprenant, nous souhaitons permettre une gestion de la granularité des classes de situations de l'entraînement. Ainsi, selon la granularité observée, les ensembles des descripteurs et ses variants seront différents.

#### Exemple de granularité de l'entraînement

Un formateur doit permettre aux apprenants, Bonnie et Clyde, de s'entraîner à la gestion de leur stress en situation de crise :

- Pour Bonnie, il décide de travailler sur un ensemble de classes de situations particulières, à savoir les situations de tri de blessés comportant des enfants alors que des bruits de bombardement se font entendre ;
- Pour Clyde, il décide de travailler sur un ensemble moins précis de classes de situations, ne sachant pas précisément quelles sont les lacunes de ce dernier. Clyde travaillera donc sur des situations mettant en scène des compétences métier impliquant une communication pendant des changements météorologiques brutaux, comme des tempêtes de différents types.

### 4.2.2 Représentation spatiale

Nous voulons pouvoir représenter l'ensemble des classes de situations utilisant les mêmes descripteurs dans un même espace. Les classes de situations pouvant présenter un nombre indéfini de descripteurs, nous devons donc prendre en compte cet aspect dans la représentation. Nous proposons d'utiliser un espace multidimensionnel pouvant être généré dynamiquement.

#### Espace de classes de situations

Soit  $S$  une classe de situations définie par  $\sigma$  le vecteur qui, pour chaque composante  $\sigma_i$  est la valeur correspondant au descripteur  $i$ .

On appelle espace de classes de situations l'espace  $S$  constitué de l'ensemble des points correspondant aux différents descripteurs de la classe

de situations.

Pour cela, l'ensemble des descripteurs doit donc être transposable dans un espace d'entiers naturels.

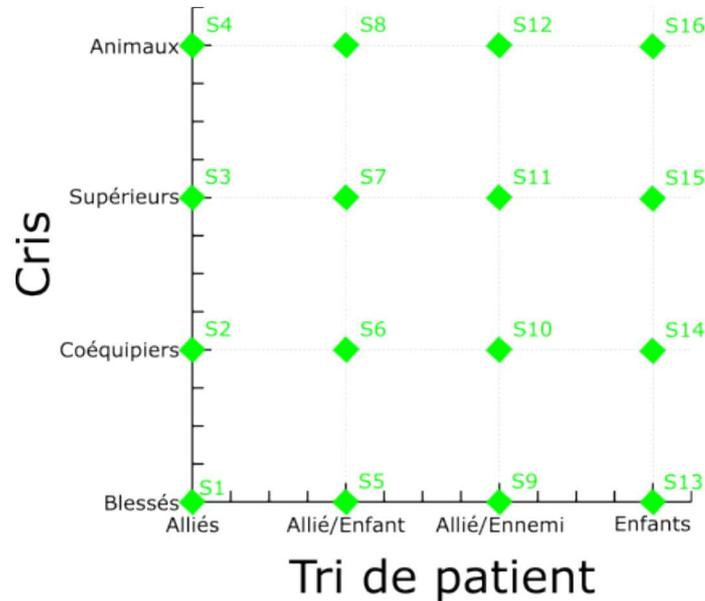


Figure 4.3 – Exemple d'espace de classes de situations dans le cadre d'application VICTEAMS

Dans son utilisation des espaces de classe de situations, [Carpentier, 2015a] soulève la difficulté de la création de tels espaces à partir de descripteurs de natures différentes.

Plus particulièrement, il met en exergue les disparités significatives dans la représentation des situations selon les différents descripteurs qu'elles utilisent.

Afin de rendre compte de ces différences dans la représentation, Carpentier propose une mesure de distance sur l'espace des entiers naturels prenant en compte l'éloignement sémantique entre deux classes de situations lors de la construction de l'espace. Il s'appuie plus particulièrement sur la distance de Manhattan entre deux classes de situations de l'espace. Il utilise cette distance dans les différents calculs sur les incertitudes permettant de créer des inférences sur l'état de maîtrise des compétences de l'espace de classes.

Cependant, cette méthode ne peut convenir à notre souhait de représentation car elle s'appuie sur les faits suivants :

- Il existe un ordonnancement pour chaque situation ;
- L'espace n'est pas généré dynamiquement.

Or, chaque individu est unique, et perçoit le stress de manière unique et personnelle, suivant son passé, ses connaissances, ou encore son état.

Il n'existe pas d'ordonnement universel des stressseurs, mais une multitude d'ordonnements des stressseurs, chacun d'eux étant propre à une personne. Il n'est donc pas correct d'utiliser la distance de Manhattan lors de la construction de l'espace de classes pour positionner les descripteurs. Notre travail repose en partie sur le fait qu'il n'est pas possible d'étudier l'intégralité des éléments stressant une personne, puisque cela dépend de beaucoup de variables. Cependant, la notion reste intéressante, notamment pour calculer la distance sémantique entre des éléments qui seraient plus distants dans le profil global, et ainsi créer des inférences sur les capacités de l'apprenant à gérer son stress sur des situations qui seraient proches d'autres situations qu'il n'aurait pas explorées.

Afin de garder cette notion, nous proposons d'utiliser des calculs de similarité sémantique au sein de la taxonomie.

Nous nous appuyons sur la mesure de la similarité sémantique de Wu et Palmer [Wu and Palmer, 1994; Tchechmedjiev, 2012], qui a l'avantage de ne s'appuyer que sur la distance entre les nœuds, sans prendre en compte l'information liée aux nœuds. On note  $h(X)$  la distance séparant le nœud  $X$  de la racine de la taxonomie ( $h(\text{racine}) = 1$ ). Soient  $N$  et  $M$  deux nœuds de la taxonomie. On note  $P$  le premier nœud parent commun à  $N$  et  $M$  ( $N \neq M$ ). On note  $sim$  la similarité sémantique entre  $N$  et  $M$  tel que :

$$sim(N, M) = \frac{2 \times h(P)}{h(N) + h(M)}$$

La similarité sémantique est d'autant plus grande (i.e. plus proche de 1) que les nœuds sont profonds et proches dans la taxonomie. Ainsi, la structure de la taxonomie à une grande importance dès son élaboration, et doit être créée avec la prise en compte du calcul à réaliser.

Il nous est alors possible d'utiliser cette distance dans les différents calculs de propagation de croyance que nous utiliserons pour étayer le profil, tout en assurant que cette distance ne soit pas basée sur la représentation des situations, le calcul étant désormais basé sur la représentation des classes.

Cette spécificité de vouloir appliquer sous forme d'espace non-ordonné ne change pas fondamentalement la représentation, mais, elle nous permet de générer dynamiquement nos espaces de classes sans avoir à se soucier des contraintes techniques liées à la représentation et à l'ordonnement [Rahmouni et al., 2021b]. Cela permet également de mettre en place des espaces non-ordonnés potentiellement grands du fait que nous ne nous soucions pas de la problématique complexe d'optimisation et d'explosion combinatoire lié à l'ordonnement.

À partir de cette représentation et de nos modifications dans le modèle existant, nous allons être en mesure de créer des espaces de classe de manière dynamique, et ce à plusieurs niveaux de granularité.

Notons qu'il existe trois types de descripteurs :

- Les descripteurs liés à une feuille de la taxonomie. Il n'y en a en fait qu'un : la difficulté ;
- Les descripteurs liés à un nœud mère d'une feuille de la taxonomie ;
- Les descripteurs liés à un nœud ayant des filles non-feuilles de la taxonomie

À partir de ces types de descripteurs, nous allons être en mesure de pouvoir représenter différents sous-ensembles du modèle d'entraînement. Plus précisément, nous sommes en mesure de générer des espaces de classes à  $n$  dimensions (vérifiant  $n \in \mathbb{N}$  et  $n \geq 2$ ) en sélectionnant  $n$  nœuds de la taxonomie. Nous devons également nous assurer qu'au moins un nœud doit être un enfant du nœud des compétences dans la taxonomie, et qu'au moins un autre doit être un enfant du nœud des stressseurs. Nous assurons ainsi que l'espace ne comprendra que des situations mettant en scène un stressseur survenant pendant que l'apprenant s'entraîne sur une compétence.

La représentation des espaces peut ainsi beaucoup varier en fonction des dimensions et des descripteurs utilisés. Ces fonctionnalités répondent aux propriétés de variabilité et de contrôle. Pour nos exemples, nous nous plaçons dans des espaces à deux dimensions.

La dimension utilisant comme descripteur une difficulté est spécifique, car c'est le seul dans laquelle il y a un ordonnancement entre les variants, mais pas de pré-requis. Les cas n'utilisant pas comme descripteur les difficultés ne présentent pas d'ordonnancement ou de notions de pré-requis.

Les différents espaces observables sont les suivants :

- Les dimensions ne sont que des feuilles de la taxonomie ;

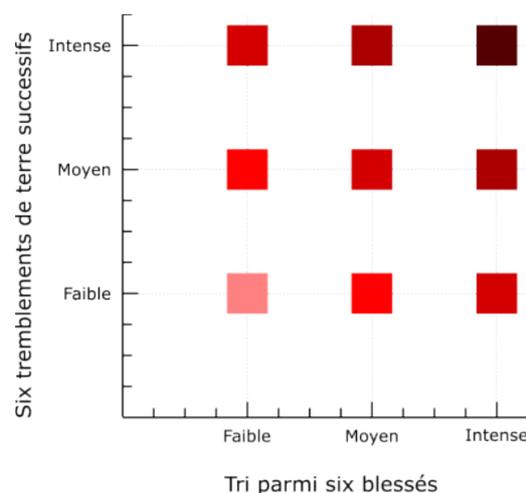


Figure 4.4 – Espace de classes à 2 dimensions utilisant deux feuilles de la taxonomie dont les descripteurs correspondent à la difficulté

- Les dimensions ne sont que des nœuds ;

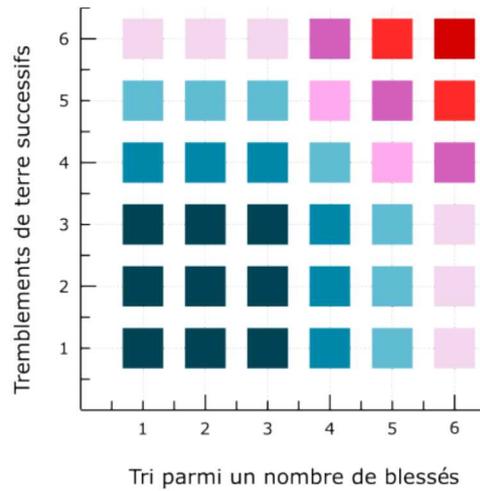


Figure 4.5 – Extrait de l'exemple de taxonomie utilisée dans le cadre d'application VICTEAMS utilisant des nœuds

— Les dimensions sont un mélange de feuilles et de nœuds ;

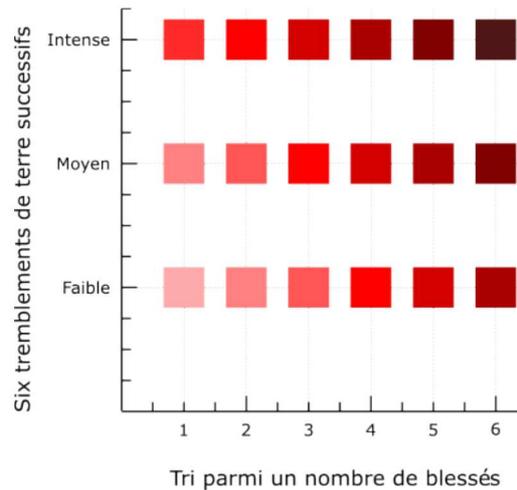


Figure 4.6 – Extrait de l'exemple de taxonomie utilisée dans le cadre d'application VICTEAMS utilisant une feuille et un nœud

En réalité, le travail à plusieurs niveaux de granularité est uniquement utilisé lors de la représentation du profil de manière visuelle pour le formateur. C'est un outil qui a pour but de permettre de réduire le domaine de connaissance de manière ponctuelle afin de centrer l'entraînement sur des points spécifiques. Cela lui permettra également de voir par la suite quelles sont les classes qui, par propagation, seront acquises ou non.

Lors de la création des espaces de classes, [Carpentier, 2015b] définit un sous-ensemble de l'espace représenté comportant l'ensemble des classes incongrues.

### Classe incongrue

Classe de situations issue de la représentation sous forme d'espace de classes mais qui n'est pas réalisable dans la réalité.

*Exemple : effectuer un tri de blessé pendant une tempête de sable et pendant une tempête de neige*

Du fait que le processus de génération des espaces de classes est dynamique, il est difficile de pouvoir détecter automatiquement l'ensemble des classes incongrues sans devoir consacrer un important travail de détection et de spécification.

Les classes incongrues pourraient également être détectées par le module de scénarisation dynamique, rendant impossible l'utilisation de ces classes dans la création du scénario.

### 4.2.3 Masses de croyance

Nous avons établi un cadre de représentation grâce aux espaces de classes de situations. Cependant, nous avons également un besoin de quantification des connaissances de l'apprenant. Comme abordé plus en détail dans la conception du profil, nous avons des connaissances issues de plusieurs sources d'information, et les données fournies sont entachées d'un grand nombre de défauts. Nous avons choisi de les représenter grâce au cadre formel que sont les masses de croyance transférables.

En formalisant la théorie des croyances transférables, on associe à chaque classe de situations  $S_i$  une distribution de masses de croyance  $m$  selon un cadre de discernement  $\Omega$  représentant l'ensemble des hypothèses qui sont émises sur l'état des compétences de l'apprenant tel que, pour une hypothèse  $B$  sur  $S_i$  :

$$m^{\Omega(S_i)} : 2^{\Omega(S_i)} \rightarrow [0, 1]$$

$$B \mapsto m^{\Omega(S_i)}(B)$$

vérifiant :

$$\sum_{B \subseteq \Omega} m^{\Omega}(B) = 1$$

$2^{\Omega(S_i)}$  contient tous les sous-ensembles possibles formés par des hypothèses et unions d'hypothèses de  $\Omega(S_i)$  avec :

$$\Omega(S_i) = \{Ability(S_i), Disability(S_i)\}$$

*Ability* est l'hypothèse selon laquelle l'apprenant est capable de gérer une situation relevant d'une classe de situations  $S_i$ , tandis que *Disability* est l'hypothèse selon laquelle l'apprenant est incapable de gérer une situation relevant d'une classe de situations  $S_i$ .

Par l'application de la fonction de distribution de masses de croyance sur son cadre de discernement  $\Omega$ , on associe à chaque classe de situations un tuple constitué de quatre masses de croyance telles que :

- $m^{\Omega(S_i)}(\{Ability\})$  est la masse de croyance sur la capacité de l'apprenant à faire face à une situation relevant de la classe  $S_i$ , notée  $a(S_i)$  ;
- $m^{\Omega(S_i)}(\{Disability\})$  est la masse de croyance sur l'incapacité de l'apprenant à faire face à une situation relevant de la classe  $S_i$ , notée  $d(S_i)$  ;
- $m^{\Omega(S_i)}(\{Ability, Disability\})$  est la masse de croyance sur l'ignorance qu'a le système à déterminer la capacité ou l'incapacité de l'apprenant à faire face à une situation relevant de la classe  $S_i$ , notée  $i(S_i)$  ;
- $m^{\Omega(S_i)}(\{\emptyset\})$  est la masse de croyance reflétant le conflit créé lorsque deux sources d'informations entrent en contradiction à propos de la capacité ou l'incapacité de l'apprenant à faire face à une situation relevant de la classe  $S_i$ , notée  $c(S_i)$ .

Ainsi :

$$\sum_{B \subseteq \Omega(S_i)} m^{\Omega(S_i)}(B) = a(S_i) + d(S_i) + c(S_i) + i(S_i) = 1$$

Ces masses de croyance ont une double fonction, et doivent :

- Fournir un cadre théorique permettant de qualifier les capacités de l'apprenant à gérer son stress ;
- Permettre la mise en place des inférences sur les situations proches de celles effectuées en entraînement.

L'une des difficultés est faire en sorte que ces masses de croyance soient intelligibles à la fois par le formateur et par l'apprenant. La représentation de ces masses doit également pouvoir être comprise sans pour autant avoir à comprendre l'intégralité du modèle mathématique sur lequel elles s'appuient.

Nous intégrons ces masses de croyance directement dans la représentation sous forme d'espace de classes de situations.

### Espace-zpd

On appelle espace-zpd l'espace de classes de situations dans lequel chaque classe de situations est décrite par le tuple créé à partir d'une distribution de masse  $(a, d, c, i)$

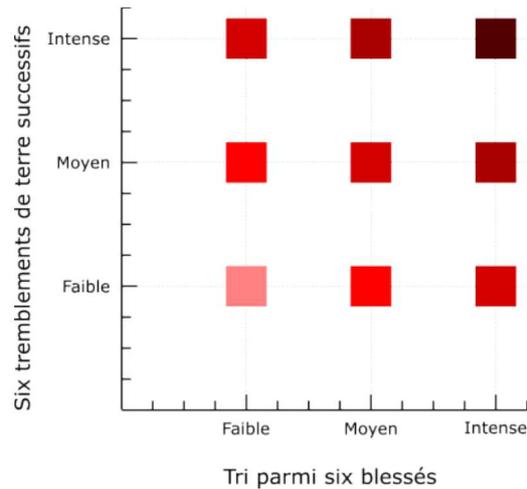


Figure 4.7 – Exemple d'espace-zpd

L'espace-zpd doit être capable de représenter les classes qui sont acquises (ZDA), proches d'être acquises (ZPD) et non acquises. Pour cela, nous nous appuyons sur la masse de croyance d'une classe de situations pour déterminer à quelle catégorie elle appartient.

Plus précisément, nous allons définir des règles afin de déterminer une valeur de seuil de l'appartenance à ces catégories.

Soit  $S$  une classe de situations. On note  $m^{\Omega(S)}$  la masse de croyance  $m$  associée à  $S$ .

#### Appartenance des classes de situations à la ZDA

$$S \in ZDA \text{ si } \begin{cases} a(S) \geq 0.8 \\ d(S) \leq 0.1 \end{cases}$$

#### Appartenance des classes de situations à la ZPD

$$S \in ZPD \text{ si } a(S) \geq 0.65$$

Ces zones ont été définies arbitrairement. Il reste possible cependant de modifier l'amplitude des espaces selon le cas d'étude. Cette amplitude permet au formateur de maîtriser la prise de décision faite par le profil sur les classes qui sont acquises ou non, et de ce fait sur les futures classes qu'il sera possible de travailler lors de l'entraînement.

Nous faisons transparaître ces appartenances directement dans la représentation sous forme d'espace-zpd par une variation de couleur et de dégradé en fonction de la masse la plus haute dans le tuple.

### Attribution de la couleur

Soit  $S$  une classe de situations et  $m$  la masse de croyance constitué du tuple  $(a, d, c, i)$ .

Dans l'espace-zpd,  $S$  est représenté :

- Sous forme de dégradé de bleu si  $a(S) \geq d(S)$  et  $a(S) > c(S)$  ;
- Sous forme de dégradé de rouge si  $d(S) > a(S)$  et  $d(S) > c(S)$  ;
- Sous forme de dégradé de violet si  $c(S) \geq a(S)$  et  $c(S) \geq d(S)$  ;
- En gris si  $i(S) = 1$  .

Ainsi, une classe appartenant à la ZDA sera teinte de bleu foncé dans l'espace-zpd, tandis qu'une classe appartenant à la ZPD sera teinte d'un bleu plus clair. Cette attribution de couleur n'est utilisée que dans le but de donner des informations au formateur et à l'apprenant dans le cadre de la représentation de l'état de ses compétences.

### Création du profil - Résumé

Nous avons détaillé l'ensemble des données utilisés pour créer le profil du stress de l'apprenant.

Grâce aux différents descripteurs que nous pouvons utiliser dynamiquement lors de la construction du profil et de sa visualisation, nous sommes capables de générer des espaces à  $n$  dimensions permettant de représenter un ensemble de situations d'apprentissages que l'on nomme classes de situations. L'ensemble de ces classes de situations compose notre domaine d'entraînement que l'apprenant explorera au cours de ses sessions d'entraînement.

Ces espaces peuvent représenter différents niveaux de granularité. Ils permettent également, au travers de la représentation des différentes masses de croyance, de quantifier les capacités de l'apprenant à gérer son stress dans chacune de ces situations.

## 4.3 Fonctionnement du profil

Par le biais d'espaces de classes de situations, nous représentons la capacité de l'apprenant à gérer son stress lors de situations particulières mettant en jeu des stressseurs pendant la réalisation des tâches qu'il se voit confiées. Afin de quantifier cette capacité, nous avons mis en place des masses de croyance permettant d'émettre une hypothèse sur les capacités de l'apprenant, et ce à partir des différents observables et capteurs que nous utilisons

afin d'obtenir des données. Ces masses de croyance sont directement intégrées à l'espace de classes, permettant de produire un espace-zpd.

Cette représentation doit être mise à jour au fil de l'utilisation du profil de stress.

Nous utilisons plusieurs sources d'informations permettant de juger des capacités de l'apprenant. De plus, il est possible qu'une classe de situations soit utilisée pour plusieurs entraînements. Nous devons définir le comportement de deux masses de croyance différentes qui décrivent la même situation. Pour cela, nous proposons de pouvoir fusionner les différentes masses de croyance décrivant les classes de situation.

### **Fusion de masses de croyance**

Combinaison des différentes masses de croyance décrivant le même état de connaissance de l'apprenant sur une classe de situations particulière.

Nous distinguons plusieurs cas différents où des fusions de masses de croyance doivent avoir lieu :

- Lors de l'agrégation de toutes les masses de croyance issues des différentes sources d'informations (capteurs, observables) sur une classe de situations ;
- Lors de la révision d'une compétence, c'est à dire lorsque une nouvelle information doit être ajoutée à l'information déjà existante ;
- Lors d'une propagation des croyances d'une situation sur celles qui lui sont proches.

Bien que le mécanisme soit identique, nous pouvons distinguer dans ces cas deux types de fusions différentes, entre des informations issues de sources différentes :

- Une fusion de sources d'informations simultanées obtenus par les capteurs et les observables ;
- Une fusion de sources d'informations issus d'une propagation.

#### **4.3.1 Fusion de croyances de sources simultanées**

La fusion de croyances de sources simultanées intervient dans le cas où le système va devoir fusionner l'ensemble des masses de croyance créées à l'issue de l'analyse des données des capteurs et des observables. Cette fusion intervient ainsi à chaque entraînement impliquant une classe de situations.

Il est possible que, lors de cette fusion, les différents observables et capteurs indiquent des informations contradictoires. Or, cette contradiction ici ne serait pas utile. À cause du caractère incertain de la détection du stress

les données des capteurs peuvent entrer en contradiction avec les données des observables, voire même entre elles. À ce stade, cette contradiction et le conflit qu'elle génère ne sont que le fruit d'une difficulté à capter le stress et à l'analyser. Nous souhaitons alors exclure ces difficultés d'interprétation. Nous proposons donc d'effectuer une fusion des masses de croyance sans conflit. Pour cela, nous devons normaliser la distribution de masse par rapport au conflit, afin de le faire disparaître. Ainsi, nous conserverons l'ensemble de l'information fournie par les différentes données des différentes sources tout en redistribuant le conflit sur le reste des différentes hypothèses de manière équitable.

La règle orthogonale de Dempster permet cette normalisation dans la distribution de masse. [Dempster, 1968, 2008; Denoeux, 2008].

### Règle dite orthogonale de Dempster [Dempster, 1968]

Soient  $m_1$  et  $m_2$  deux masses de croyance distinctes et définies sur le même cadre de discernement noté  $\Omega$ , supposé fiable.

$$\begin{aligned} m_{\overline{1,2}}(A) &= m_1(A) \oplus m_2(A) \\ m_{\overline{1,2}}(A) &= \frac{1}{1-K} \sum_{B \cap C = A \neq \emptyset} m_1(B) m_2(C) \end{aligned}$$

où

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C)$$

Par application à notre domaine, nous pouvons définir les équations suivantes, permettant la fusion sans conflit souhaitée :

### Équations de fusion de masses de croyance sans conflit

Soient  $m_1^{\Omega(S)}$  et  $m_2^{\Omega(S)}$  deux masses de croyance distinctes et définies sur le même cadre de discernement noté  $\Omega$  tel que

$$\Omega(S_i) = \{Ability(S_i), Disability(S_i)\}$$

Soit  $m_R^{\Omega(S)}$  la masse de croyance issue de la fusion  $m_1$  et  $m_2$ . Par application de la règle dite orthogonale de Dempster sur  $\Omega$  :

$$\begin{aligned} a_R &= \frac{a_1 \times a_2 + i_1 \times a_2 + i_2 \times a_1}{1 - a_1 \times d_2 - a_2 \times d_1} \\ d_R &= \frac{d_1 \times d_2 + i_1 \times d_2 + i_2 \times d_1}{1 - a_1 \times d_2 - a_2 \times d_1} \\ i_R &= \frac{i_1 \times i_2}{1 - a_1 \times d_2 - a_2 \times d_1} \end{aligned}$$

Nous utiliserons cette fusion pour des masses de croyance issues de l'analyse des observables et des capteurs. La masse  $m_R$  représente ainsi la fusion entre les masses  $m_{Observables}$  et  $m_{Capteurs}$ .

$m_{Observables}$  est créée à partir des données métriques calculées d'après les observables de l'environnement. Plus précisément, la masse de croyance est déterminée en fonction de trois critères :

- La réussite de la tâche métier de l'apprenant ;
- Le nombre d'erreurs potentielles de l'apprenant dans le cadre d'une tâche répétée ;
- Le temps mis à effectuer la tâche.

Grâce à la fusion sans conflit, nous rapprochons la problématique de création de  $m_{Observable}$  à la fusion des trois masses de croyance correspondant à chaque critère. Cela est également possible car la fusion des masses selon la règle orthogonale de Dempster est commutative. Ces masses de croyance sont déterminées selon des règles de paramétrage propres à chaque compétence métier spécifiée dans la taxonomie.

### Exemple

L'apprenant, dans le cadre d'un entraînement, doit effectuer des tris de blessés successifs pendant un bombardement.

$S$ , la classe de situations liée, est créée à partir des noeuds « Effectuer des tris de blessés successifs » et « Bruits de bombardement ». La difficulté pour cet entraînement est de niveau moyenne.

« Effectuer des tris de blessés successifs » est une compétence métier. Afin qu'elle soit considérée comme acquise, l'apprenant doit être capable de répondre aux contraintes suivantes :

- L'apprenant doit trier dix blessés de suite ;
- Sur les dix blessés, seuls 4 doivent être acceptés ;
- L'apprenant a quarante secondes par blessé pour prendre sa décision.

Le paramétrage exact du système pour cet exemple est le suivant :

- Pour le nombre de blessés à accepter effectivement admis ;

Nombre de blessés à accepter effectivement admis	Masses de croyance liées
0	(0,1,0,0)
1	(0.25,0,0,0.75)
2	(0.5,0,0,0.5)
3	(0.75,0,0,0.25)
4	(1,0,0,0)

Figure 4.8 – Conversion de réussite de la tâche d'un observable en masse de croyance

- Pour le nombre d'erreurs au total ;

Nombre d'erreurs	Masses de croyance liées
10	(0,1,0,0)
9	(0,0.9,0,0.1)
8	(0,0.8,0,0.2)
7	(0,0.7,0,0.3)
6	(0,0.6,0,0.4)
5	(0.5,0,0,0.5)
4	(0.6,0,0,0.4)
3	(0.7,0,0,0.3)
2	(0.8,0,0,0.2)
1	(0.9,0,0,0.1)
0	(1,0,0,0)

Figure 4.9 – Conversion du nombre d'erreurs au total d'un observable en masse de croyance

— Pour le temps d'exécution moyen.

Temps moyen	Masses de croyance liées
> 50 secondes	(0,1,0,0)
40 - 50 secondes	(0,0.6,0,0.4)
30 - 40 secondes	(0.6,0,0,0.4)
< 30 secondes	(1,0,0,0)

Figure 4.10 – Conversion du temps moyen d'exécution d'une tâche d'un observable en masse de croyance

Ce paramétrage est automatique dans le système, et réalisé de manière arbitraire. Cependant, nous voulions pouvoir laisser la possibilité d'adapter les paramètres, notamment afin de proposer un système le plus adaptatif possible à d'autres cadres d'applications. Il est ainsi possible d'éditer les paramètres par classe de situations dans l'interface qui est proposée au formateur. Cependant, ce paramétrage est important, et nécessite donc une certaine compréhension de l'intégralité du modèle. Cela rend difficile l'accès à ces modifications qui ne doivent pas être réalisées aléatoirement. Nous détaillerons cette limite dans la discussion.

### 4.3.2 Fusion de croyances lors d'une propagation

La fusion de croyances lors d'une propagation intervient dans le cas où le système va devoir fusionner une masse de croyance déjà calculée  $m_1$  et une masse de croyance  $m_2$  issue d'un nouvel entraînement. En d'autres termes, cette fusion intervient lorsque le système juge qu'il est possible que  $m_1$  puisse être améliorée à partir des connaissances de  $m_2$ . Cette action est effectuée à chaque fois qu'une nouvelle masse de croyance est ajoutée suite à l'entraînement d'une classe de situation. La propagation de croyance est donc effectuée régulièrement. Cependant, nous devons prendre en compte lors de cette fusion que les informations apportées peuvent se révéler fausses, ou encore en contradiction entre elles.

Pour cela, la fusion de croyances lors d'une propagation se réalise en deux étapes distinctes. La première étape consiste à créer la masse de croyance à partir de celle que l'on juge capable de fournir de l'information à la seconde. Pour cela, nous devons utiliser une fonction d'affaiblissement. Puis, nous devons fusionner ces deux masses de croyances, en utilisant dans ce cadre précis une fusion avec conflit afin de pouvoir mettre en évidence les conflits entre plusieurs connaissances du modèle qui auront besoin d'être levés par le biais d'entraînements supplémentaires.

#### Règle de combinaison conjonctive

Soient  $m_1$  et  $m_2$  deux masses de croyance distinctes et définies sur le même cadre de discernement noté  $\Omega$ , supposé fiable.

$$\begin{aligned} m_{1,2}(A) &= m_1(A) \oplus m_2(A) \\ m_{1,2}(A) &= \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \end{aligned}$$

Commençons par détailler la règle de fusion. Par application de la règle de combinaison conjonctive de Shafer, la fusion de deux distributions de masse de croyance  $m_1$  et  $m_2$  forme une nouvelle distribution de masses de croyance  $m_R$  telle que :

$$\begin{aligned} a_R &= a_1 \times a_2 + i_1 \times a_2 + i_2 \times a_1 \\ d_R &= d_1 \times d_2 + i_1 \times d_2 + i_2 \times d_1 \\ i_R &= i_1 \times i_2 \\ c_R &= 1 - a_R - d_R - i_R \end{aligned}$$

Comparée à la règle orthogonale de Dempster, la combinaison conjonctive de Shafer garde les conflits qui se créent du fait qu'aucune normalisation n'est opérée.

Il est possible d'étendre une distribution de masse de croyance d'une situation  $S_A$  vers une situation  $S_B$ . Cette propagation permet d'émettre des suppositions quant à la maîtrise d'une classe de situations proche d'une autre

classe. On note  $\Phi(S_A, S_B)$  la croyance propagée de  $S_A$  jusqu'à  $S_B$  selon une fonction de propagation  $\Phi$  utilisant la règle d'affaiblissement simple [Shafer, 1976].

### Règle d'affaiblissement simple de Shafer

$$\begin{aligned} m^\alpha(A) &= (1 - \alpha) \times m(A), \forall A \subset \Omega \\ m^\alpha(\Omega) &= (1 - \alpha) \times m(\Omega) + \alpha \end{aligned}$$

avec  $\alpha$  le coefficient d'atténuation.

Ainsi :

$$\Phi(S_A, S_B) = (\Phi_a(S_A, S_B), \Phi_d(S_A, S_B), \Phi_c(S_A, S_B), \Phi_i(S_A, S_B))$$

$$\begin{aligned} a_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_a(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d \times a_{S_A} \\ d_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_d(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d \times d_{S_A} \\ c_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_c(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d \times c_{S_A} \\ i_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_i(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d \times (i_{S_A} - 1) + 1 \end{aligned}$$

avec  $d$  la distance entre les deux classes de situations  $S_A$  et  $S_B$  [Carpentier, 2015b].

Nous nous appuyons sur la fonction de propagation afin de propager les croyances entre les classes de situations, au travers de l'ensemble de la taxonomie. Cependant, la distance  $d$  doit être définie, ainsi que le coefficient  $\alpha$ .

Nous proposons d'utiliser une mesure de la similarité sémantique pour cela.

Nous décidons de calculer la similarité sémantique entre les deux classes de situations  $S_A$  et  $S_B$  en appliquant la mesure de Wu et Palmer [Wu and Palmer, 1994]. Cette mesure a l'avantage de ne s'appuyer que sur la distance entre les nœuds, sans prendre en compte l'information liée aux nœuds.

Nous proposons d'intégrer cette similarité dans le coefficient  $\alpha$  tel que  $\alpha = 1 - sim(A, B)$ . Ainsi, par application de la règle d'affaiblissement simple :

$$\begin{aligned} a_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_a(S_A, S_B) = sim(A, B) \times a_{S_A} \\ d_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_d(S_A, S_B) = sim(A, B) \times d_{S_A} \\ c_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_c(S_A, S_B) = sim(A, B) \times c_{S_A} \\ i_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_i(S_A, S_B) = sim(A, B) \times (i_{S_A} - 1) + 1 \end{aligned}$$

Ainsi, plus les classes seront distantes dans la taxonomie, et plus la propagation de croyance de  $S_A$  jusqu'à  $S_B$  sera faible.

### 4.3.3 Révision

Le mécanisme de révision intervient au moment où deux croyances définissent la même classe de situations. Ce cas peut intervenir après deux actions particulières :

- Lors d'une propagation de croyance ;
- Lorsque qu'une situation fait l'objet d'un nouvel entraînement.

En d'autres termes, la révision a lieu à chaque entraînement, car la propagation de croyance est effectuée dès lors qu'une nouvelle masse de croyance est ajoutée au profil.

Nous devons utiliser un opérateur de révision, afin de prendre en compte l'ensemble des informations pour une même classe.

Pour cela, nous réutilisons l'opérateur de fusion de croyances que nous avons défini lors de la fusion d'une propagation. En d'autres termes, quel que soit le cas, nous utilisons une fusion non normalisée s'appuyant sur la combinaison conjonctive de Shafer afin de pouvoir garder les éventuels conflits qui pourraient se créer. Ces conflits sont essentiels dans le modèle pour identifier les potentielles erreurs commises qui nécessitent un nouvel entraînement.

#### Fonctionnement du profil - Résumé

À travers plusieurs règles liées aux fonctions de croyance et au modèle des croyances transférables, nous avons décrit l'ensemble des mécanismes permettant au profil d'évoluer au fil du temps.

Cette évolution prend en compte à la fois les données physiologiques de l'apprenant liées à son stress et les données quantitatives issues de ses actions dans l'environnement.

# Chapitre 5

## Moteur de scénarisation dynamique d'entraînement à la gestion du stress

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des éléments descriptifs et conceptuels que nous avons mis en place afin de créer un ensemble de règles de planification utilisable par un modèle de scénarisation. Ces règles permettent la mise en place d'une scénarisation spécifique pour l'entraînement aux situations de crise. Nous présenterons également les méthodes permettant d'assurer la cohésion narrative au sein du scénario. Nous présenterons enfin les différentes techniques mises en place pour gérer l'évolution de la difficulté des tâches dans le scénario.

### 5.1 Une scénarisation pour les situations de crise

Les scénarios que nous devons mettre en place doivent permettre l'entraînement aux situations complexes et particulières que sont les situations de crise.

#### 5.1.1 Théorie narrative des contes du Gange

Comme évoqué dans l'état de l'art, nous avons fait le choix de calquer la construction du scénario sur une structure narrative existante afin de maintenir la cohérence narrative au sein du scénario dans un objectif d'assurer chez l'apprenant un état de flow. Ce choix s'est porté sur la structure des contes du Gange [Koenitz et al., 2018], issu de la littérature.

Nous avons principalement évoqué la proximité avec les événements en situation de crise pour justifier l'utilisation de cette structure. Détaillons le fonctionnement de cette structure.

Les contes du Gange ont pour particularité de mettre le héros à la fois comme acteur agissant dans le but de résoudre les situations conflictuelles ou problématiques, mais également comme instigateur de ces situations. Plus précisément, ce sont les choix et les actions du héros faits dans le but de résoudre une situation particulière qui vont entraîner de nouvelles perturbations dans le récit et amener la création d'une nouvelle situation à résoudre.

#### Structure des contes du Gange [Koenitz et al., 2018]

Structure narrative dans laquelle la solution à un conflit entraîne immédiatement l'apparition d'un nouveau conflit.

La situation initiale est narrée sous la forme d'une action initiale (IA) ayant des conséquences directes et spécifiques (C) sur l'état du monde du héros. Le héros cherche à résoudre ces conséquences par la recherche d'une solution (S). Cette solution va entraîner la résolution (R) des conséquences de l'action initiale, mais également de nouvelles conséquences problématiques que le héros devra également résoudre. Ces conséquences sont de plus en plus complexes à résoudre, jusqu'à atteindre une situation finale où la résolution n'apporte plus de nouvelles conséquences. Cette structure narrative est dite cumulative, où chaque choix du héros va affecter l'ensemble de la narration.

L'accumulation de situations problématiques de plus en plus complexes se traduit également par une tension narrative croissante. Dans notre approche, nous associerons cette tension narrative à la difficulté des classes de situations que nous voulons mettre en place. Au fur et à mesure de l'entraînement, le scénario deviendra de plus en plus difficile, ce qui a pour but de maintenir l'engagement de l'apprenant. Le système pourra également assurer le *game balancing* pendant l'exécution en utilisant un modèle pré-défini, ce qui permettra d'ajuster la difficulté du scénario en temps réel en fonction des actions de l'utilisateur, tout en préservant la cohérence narrative du récit.

Nous pouvons également remarquer que cette structure représente une évolution cyclique de l'histoire. Les éléments C, S et R se répètent sous forme d'arc narratif, et ce jusqu'à atteindre une situation finale. Nous appellerons **segment** une portion de l'histoire correspondant à un ensemble composé des éléments scénaristiques décrivant *Consequence, Solution, Resolution*.

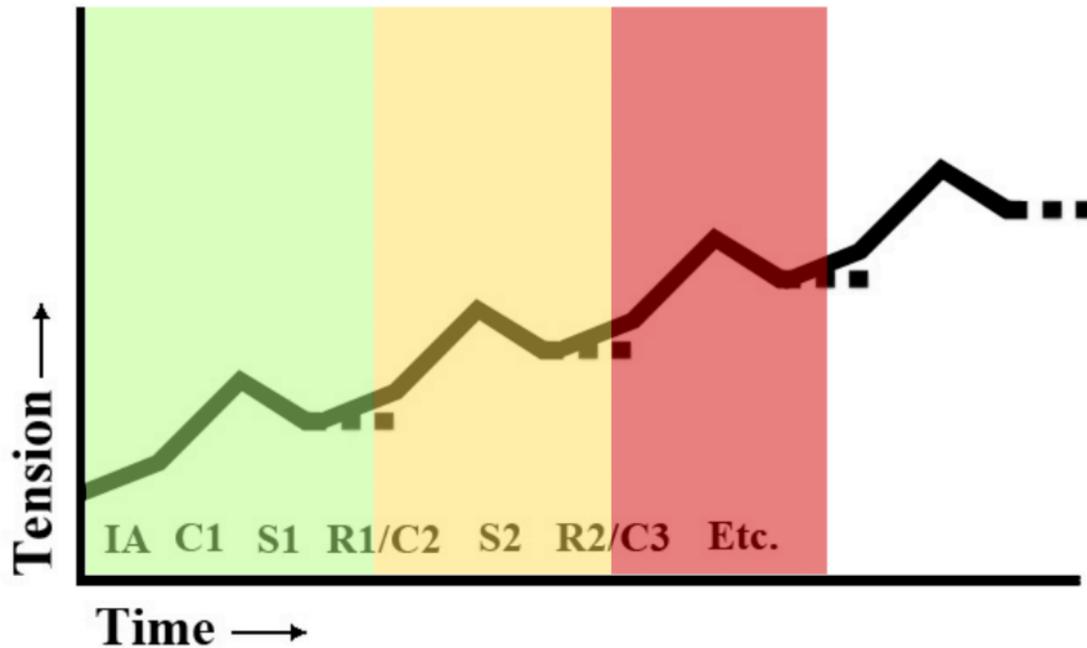


Figure 5.1 – Schématisation de la structure des contes du Gange dans [Koenitz et al., 2018]. Les zones colorées correspondent aux différents segments dans le scénario

La théorie des contes du Gange met ainsi énormément l'accent sur le rôle du héros, et sur sa confrontation aux conséquences de ses choix. Le lien avec les EVAH semble ainsi immédiat, où l'on essaye de confronter l'apprenant à ses choix afin de lui transmettre un savoir ou de l'entraîner.

Ainsi, à partir de cette théorie, notre objectif est de proposer un ensemble de méthodes et de règles afin de permettre de générer l'ensemble de cette structure narrative dans le cadre d'un scénario utilisant notre profil de stress.

### 5.1.2 Une approche semi-scriptée

Générer un ensemble de scénarios revient à s'interroger sur les différentes manières d'assembler les éléments qu'il est possible de mettre en place dans l'environnement virtuel.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser les classes de situations de notre profil de stress comme élément central sur lequel s'appuyer lors de la génération du scénario à mettre en place pour étendre ce profil. Ces classes de situations représentent des situations pédagogiques précises, et doivent permettre à l'apprenant d'en tirer des bénéfices, que ce soit par l'entraînement de ses compétences déjà acquises ou l'obtention de nouvelles compétences. Pour cela, l'enchaînement des événements au sein du scénario permettant le travail d'une situation particulière doit faire l'objet d'une attention particulière. Le cas échéant, la situation pourrait ne pas être bénéfique pour

l'apprenant, voire même lui véhiculer de fausses connaissances, allant perturber ses compétences.

### Exemple

La procédure SAFE-MARCHE-RYAN est une procédure médicale militaire visant à effectuer toutes les actions dans le but de sécuriser l'environnement en vue de la prise en charge d'un blessé de guerre, ainsi que les premiers soins à apporter à ce blessé pour le stabiliser.

Dans le cadre d'une classe de situations mettant en scène un des éléments ou la globalité de cette procédure, une erreur dans la génération des étapes pourrait amener à fournir de fausses informations aux apprenants, les conduisant potentiellement à faire des erreurs lors d'une situation réelle.

Cependant, ces classes de situations sont elles-mêmes générées dynamiquement en fonction des différents noeuds de la taxonomie les constituant, celle-ci étant créée par le formateur. Il faudrait donc en principe générer dynamiquement et correctement la description des enchaînements des événements permettant de travailler des classes de situations au travers des scénarios.

Bien qu'il serait intéressant de traiter cette question, nous avons fait le choix dans nos travaux de réaliser une approche semi-scriptée afin de nous concentrer sur la mise en place de la théorie des contes du Gange et de l'ensemble des techniques de narration permettant la mise en place d'un état de flow chez l'apprenant.

Cette approche semi-scriptée s'appuie sur une description faite en amont des enchaînements des événements permettant de réaliser une classe de situations. L'avantage de cette approche réside dans la qualité des enchaînements, qui correspondront aux attentes de celui tenant le rôle d'auteur pour cette étape. On parlera d'adéquation avec la vision de l'auteur. Cette adéquation se fait cependant au prix d'une phase préparatoire de description en amont.

## 5.2 Éléments de description du scénario

L'objectif est de confronter l'apprenant à un maximum de classes de situations, tout en assurant le cheminement le plus optimal dans les différentes situations. C'est pourquoi le profil de stress crée automatiquement des hypothèses sur des situations proches de celles que l'apprenant maîtrise, réduisant ainsi le nombre de situations à explorer. À chaque passage de l'apprenant dans l'environnement virtuel, le gestionnaire du profil va sélectionner les situations particulières à résoudre dans l'entraînement. Ensuite, un planificateur auxiliaire à notre contribution sera chargé de construire l'histoire à

partir des éléments sélectionnés. Ce planificateur ne faisant pas l'objet de la thèse, celui-ci n'a pas été réalisé, et fera l'objet de travaux futurs s'appuyant sur le travail que nous présentons.

Afin de décrire les classes de situations, nous devons utiliser des éléments qui seront à la fois :

- structurels, c'est à dire qui décrivent l'organisation du scénario ;
- descriptifs, c'est à dire qui décrivent le contenu des scènes du scénario ;
- modulaires, c'est à dire qui peuvent être permutés entre eux.

### 5.2.1 Nœud

Nous définissons un **nœud** comme le plus petit élément descriptif d'un scénario. Chaque nœud permettra de décrire un élément spécifique du scénario. Il est défini par :

- Un label ;
- Les conditions préalables au déclenchement de ce nœud ;
- Les effets après le déclenchement de ce nœud.

Un nœud est utilisé pour décrire :

- Les observables de l'environnement virtuel qui peuvent être liés aux actions du joueur ou des personnages non joueurs, ou des changements de l'état de certains éléments de l'environnement ;
- Les ajustements dans l'environnement virtuel ou les événements qui ne dépendent pas d'un observable, tels que des effets visuels ou sonores ou encore l'apparition d'un véhicule.

Certains nœuds sont associés à une feuille de la taxonomie des stressseurs. Par conséquent, ces nœuds représenteront soit un effet créant ce stressseur, soit l'une des actions requises pour exécuter une compétence. À chacun de ces nœuds particuliers est associée une difficulté, représentée sous forme d'un entier entre un et trois que l'on note  $d_D$ . Cette difficulté représente la difficulté de la feuille de la taxonomie auquel le nœud se réfère. Ses valeurs peuvent être : faible (1), moyen (2) et fort (3).

En optant pour une ontologie, il devient possible de décrire l'ensemble des nœuds de manière exploitable par le système de scénarisation pour les intégrer dans le scénario. L'un des principaux avantages de cette approche est la présence de liens logiques entre les différents nœuds, ce qui permet de planifier des mécanismes de remplacement de nœuds ou de prévoir les différents liens de causalité possibles entre ces derniers. Toutefois, cette méthode

requiert de spécifier un grand nombre de nœuds, bien qu'il soit possible de décrire certains d'entre eux de manière plus abstraite.

### 5.2.2 Fragment

Afin de décrire une classe de situations complète, nous avons besoin d'associer plusieurs nœuds entre eux. Cette association doit respecter l'ensemble des préconditions de chaque nœud.

Cette séquence de nœuds que l'on nomme **fragment** correspond à une partie du scénario, et pourrait s'apparenter à une description sous la forme d'une carte cognitive floue partielle [Papageorgiou and Salmeron, 2012; Lacaze-Labadie et al., 2018].

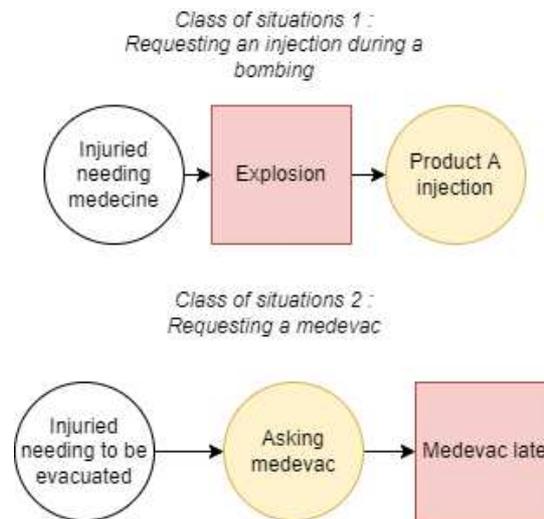


Figure 5.2 – Exemple de représentation de classes de situations sous forme de fragments avec une situation problématique initiale (blanc), un nœud de stresser (rouge) et un nœud de compétence (jaune).

Chaque fragment est associé à une classe de situation utilisable du profil de stress de l'apprenant. Au minimum, il est composé des nœuds suivants :

- Un nœud permettant la description d'une situation problématique initiale ;
- Un nœud permettant de décrire la résolution de cette situation par le biais de la réalisation d'une compétence ;
- Un nœud permettant de décrire le stresser utilisé dans la classe de situations.

Chaque fragment est associé à une difficulté calculée en fonction des descripteurs qui composent la classe de situations utilisée dans le fragment. On note  $d_{Fragment}$  l'entier représentant la difficulté du fragment tel que, pour chaque descripteur  $D_i$  composant le fragment avec une difficulté de  $d_{D_i}$  :

$$d_{Fragment} = \sum_{i=0}^n d_{D_i} \quad (5.1)$$

Cette difficulté permettra à la fois de définir la construction du scénario, mais également de gérer la difficulté de ce dernier pendant son exécution.

### 5.2.3 Segment

Un segment est un ensemble de nœuds représentant une situation complète dans la structure narrative du Gange et construit à partir d'un fragment.

Grâce aux préconditions de chaque nœud, le planificateur va ajouter des nœuds supplémentaires au sein du fragment afin d'apporter des éléments narratifs de description tels que des explications, des éléments précédant l'exécution d'un autre nœud ou encore des événements nécessaires à l'occurrence d'un nœud. Les nœuds utilisables par le planificateur sont pré-scriptés dans une base de données.

La création d'un segment permet ensuite de mettre en œuvre la théorie du fusil de Tchekhov et le principe du *foreshadowing* [Bae and Young, 2008; Bae et al., 2013], assurant la cohérence narrative au sein du segment. Nous supposons également que l'utilisation de ces théories permet à l'apprenant de travailler ses capacités d'anticipation.

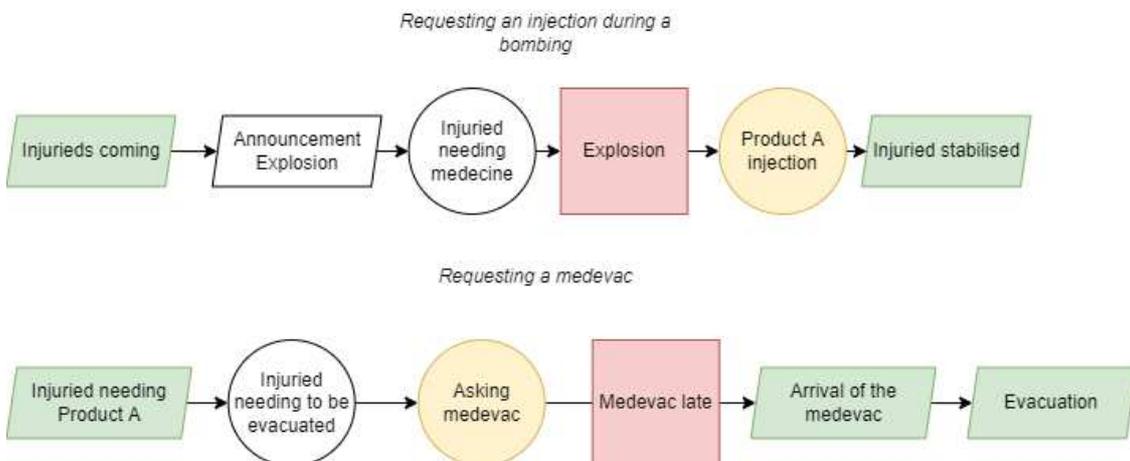


Figure 5.3 – Exemple de segments de scénario utilisant les classes de situations de l'exemple 5.2

## 5.3 Création du scénario

La création d'un scénario d'entraînement repose sur une suite de processus permettant à la fois de sélectionner les situations d'entraînements et de définir la structure et les enchaînements des événements du scénario.

Nous détaillerons les différents critères de sélection des classes de situations ainsi que le processus permettant de créer le scénario dans sa globalité.

### 5.3.1 Sélection des classes de situations

Le choix des classes de situations sur lesquelles porteront l'entraînement répond à un algorithme de sélection.

Cet algorithme va être en charge de sélectionner dans les classes candidates celles qui vont servir lors de la création du scénario. Le nombre de classes à sélectionner définit la longueur du scénario, et est paramétrable directement par le formateur. Par défaut, chaque scénario est construit à partir de trois classes de situations différentes.

On distingue trois ensembles dans lesquels les classes candidates peuvent être sélectionnées :

- L'ensemble des classes ne faisant pas partie de la ZDA ;
- L'ensemble des classes de la ZPD ;
- L'ensemble des classes n'étant ni dans la ZDA, ni dans la ZPD.

Le choix de cet ensemble est un paramètre laissé au choix du formateur lorsque celui-ci utilise l'interface dédiée au suivi du profil de stress. Bien que notre conception du parcours du profil se soit faite autour de l'ensemble de classes de la ZPD, nous avons laissé la possibilité de choisir l'un des deux autres sous-ensembles. Ce choix permet de modifier la façon dont est abordée l'évolution du profil de stress de l'apprenant. Détaillons ces différentes approches :

#### **Ensemble des classes ne faisant pas partie de la ZDA**

Cet ensemble correspond à toutes les classes de situations qui ne vérifient pas la condition d'appartenance à la ZDA, soit  $a(S) \geq 0.8$  et  $d(S) \leq 0.1$ .

Choisir cet ensemble de classes pour l'évolution du profil revient à faire un parcours du profil ne prenant pas en compte le principe de la ZPD. Le parcours ne se centrera donc pas obligatoirement sur les compétences proches d'être acquises. Bien que ce choix reste possible, celui-ci ne correspond pas à une méthode de parcours de profil et ayant un objectif explicable.

#### **Ensemble des classes de la ZPD**

Cet ensemble correspond à toutes les classes de situations qui vérifient  $a(S) \geq 0.65$ , mais ne vérifiant pas  $a(S) \geq 0.8$  et  $d(S) \leq 0.1$ .

Choisir cet ensemble de classes permet une évolution centrée sur les compétences de l'apprenant proche d'être acquises. Le parcours se centrera

ainsi sur des situations qui, a priori, seront plus faciles à maîtriser pour l'apprenant.

### **Ensemble des classes hors ZPD**

Cet ensemble correspond à toutes les classes de situations qui ne vérifient pas  $a(S) \geq 0.65$ .

Choisir cet ensemble pour l'évolution du profil revient à faire un parcours dont le but est d'intégrer des classes distantes dans la ZPD, ou au mieux, dans la ZDA. Ceci ce fait au prix d'un entraînement qui devrait être plus complexe pour l'apprenant utilisant une classe éloignée de ce qu'il sait faire correctement ou presque correctement.

Bien que cet ensemble ne soit pas celui prévu initialement lors de la conception, celui-ci garde un intérêt, car il permet une exploration de différentes classes de situations en suivant un parcours non linéaire et ne s'appuyant pas sur ce que l'apprenant est déjà proche de maîtriser. Il est également à noter qu'à l'initialisation du profil, c'est bien cet ensemble qui est sélectionné car l'apprenant n'aura réalisé aucun entraînement, et aura donc un profil ne présentant aucune classe de situations validant les critères d'appartenance à la ZDA ou à la ZPD.

Plusieurs algorithmes fonctionnent conjointement pour sélectionner les classes de situations qui seront utilisées pour la scénarisation automatique au sein de ces trois différents ensembles. Ils diffèrent les uns des autres par le parcours qu'ils opèrent dans l'ensemble des classes de situations candidates à la sélection.

Soit  $C_c$ , la classe de situations candidate la plus favorable. Soit  $E$  l'ensemble des classes sélectionnées. soit  $f$  l'algorithme qui, pour un ensemble donné  $E$ , retourne la classe de situation la plus favorable.

Les différentes fonctions  $f(C_i)$  que nous utilisons sont les suivantes :

- algorithme de sélection arbitraire
- algorithme de recherche glouton
- algorithme des k plus proches voisins

### **Sélection arbitraire dans les classes candidates**

La première fonction permettant de sélectionner les prochaines classes de situation qui feront l'objet d'un entraînement est un algorithme de sélection arbitraire.

Au sein de l'ensemble de classes sélectionnées, l'algorithme aura pour fonction de donner les n classes choisies aléatoirement qui constitueront le scénario.

Cette méthode de sélection est ainsi celle qui ne cherche pas à optimiser le parcours du profil. Cependant, elle offre une liberté d'exploration bien plus importante que les autres types de sélection. Il nous semblait ainsi intéressant de pouvoir proposer cette méthode, qui est notamment utilisable au début de la création du profil lorsque l'apprenant n'a pas ou peu effectué d'entraînements afin de découvrir au fil d'entraînements variés ses forces ainsi que ses faiblesses.

### **Sélection grâce à un algorithme glouton**

La sélection selon un algorithme glouton a pour objectif de trouver les meilleures classes candidates selon un objectif particulier dans l'ensemble des classes candidates. On parle de recherche de l'optimum.

Afin de sélectionner notre optimum, nous devons définir les règles permettant d'identifier le critère qui permettra de comparer les classes entre elles. Dans notre cas, l'objectif est de couvrir un maximum de situations au sein du profil en effectuant le moins d'entraînements possible. En d'autres termes, nous aimerions intégrer un maximum de classes dans la ZDA en un minimum de temps. Nous cherchons ainsi à maximiser le rapport temps passé à l'entraînement et création d'informations positives sur le profil.

Nous proposons de sélectionner les classes optimum selon leur aire d'influence dans le cadre de la théorie des masses de croyances transférables transposées à notre taxonomie. En d'autres termes, l'objectif est de trouver quelle est la classe qui, une fois l'entraînement effectué, va influencer le plus positivement le profil de l'apprenant. Ainsi, l'algorithme va avoir pour objectif de parcourir l'ensemble des classes candidates de l'ensemble sélectionné tout en déterminant les classes qui, une fois l'entraînement effectué, permettront d'intégrer le plus de classes dans la ZDA.

### **Sélection dans les k plus proches voisins d'une classe de situation**

La dernière méthode de sélection que nous proposons s'inspire du concept des k plus proches voisins, qui est un algorithme populaire dans le cadre de l'apprentissage automatique que nous avons étudié.

L'objectif n'est plus de chercher dans l'un des ensembles que nous avons précédemment décrits, mais de déterminer les k classes les plus proches dans la taxonomie d'une autre classe sélectionnée par le formateur. C'est une méthode qui permet au formateur de garder un contrôle sur l'entraînement en visant des classes particulières, quelles soient dans la ZPD ou non.

Cette méthode de sélection prend donc en entrée deux paramètres :

- Une classe de situation du profil ;
- Un entier  $k$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) représentant le nombre de classes qui seront dites candidates.

Dans le cas où  $k = 0$ , la classe sélectionnée sera celle renseignée dans les paramètres. Cet algorithme permet donc également au formateur de forcer le système à utiliser une classe particulière.

En réalité, cette méthode seule ne permet pas, sauf dans le cas particulier décrit, de sélectionner une classe, mais de restreindre le nombre de classes candidates. Afin de faire de cette méthode une méthode de sélection, nous la couplons avec la méthode de sélection arbitraire ou avec la méthode de sélection par recherche d'un optimum parmi les  $k$  classes candidates. Le choix entre ces deux méthodes de sélection se fait également via un paramètre laissé au choix du formateur.

Le scénario doit comporter plusieurs classes de situation, et le système sélectionnera plusieurs classes de situations en utilisant les méthodes et les ensembles que nous avons présentés précédemment. Pour respecter la structure des contes du Gange et offrir une difficulté croissante, le système se basera sur la dernière classe sélectionnée pour choisir la suivante. Le système s'assurera que la classe sélectionnée a une difficulté supérieure en utilisant des stressseurs plus complexes.

### Sélection des classes pour la scénarisation - Résumé

Au travers d'une description des différents ensembles de recherche possibles et de plusieurs méthodes de sélection, nous proposons un système paramétrable permettant de sélectionner les différentes classes de situations qui feront l'objet d'une scénarisation pour le prochain entraînement qu'effectuera l'utilisateur.

Cette sélection permet non seulement d'assurer la personnalisation par rapport au profil de l'apprenant, mais aussi de laisser un contrôle total au formateur qui le souhaite sur la scénarisation de l'entraînement. L'ensemble de ces algorithmes se veulent ainsi être une aide à la décision, et non pas un remplacement complet du formateur et de son expertise, aspect que nous voulions respecter dans la conception de ce système.

Le système permet ainsi une utilisation automatique, ou une utilisation plus complexe et paramétrable selon la volonté du formateur.

### 5.3.2 Création des segments narratifs

À partir des classes sélectionnées, le système doit être capable de passer d'une description parcellaire d'une situation d'apprentissage à un segment narratif et utilisable dans le cadre d'un scénario complet. Nous avons décrit les différents éléments permettant de représenter des éléments narratifs du scénario. Dans cette section, nous décrivons l'ensemble des étapes permettant de passer de la description d'une classe de situations sous forme de fragments aux segments de scénario.

### Des classes aux fragments

L'objectif de cette étape est de passer d'une description littérale d'une situation d'apprentissage particulière à un ensemble d'éléments utilisables dans le cadre d'une scénarisation.

Pour ce faire, nous devons transformer chaque classe de situations sélectionnée en un ensemble de fragments composés de noeuds.

Pour rappel, un fragment est un ensemble de noeuds, et est composé d'un noeud pour chaque dimension décrivant la classe de situations ainsi que d'au moins un noeud supplémentaire permettant de décrire la situation problématique initiale de la situation. L'objectif principal de cette étape est ainsi de déterminer les différentes règles permettant à un planificateur d'assembler plusieurs noeuds pour former le fragment.

Nous avons fait le choix dans notre approche de scripter l'ensemble des noeuds liés aux feuilles de la taxonomie, ainsi que l'ensemble des noeuds qui permettront de faire des liens entre les préconditions et les effets d'autres noeuds.

Ainsi, la difficulté de cette étape consiste à ordonner correctement l'ensemble des noeuds qui doivent être présents dans le fragment.

### Conditions et conséquences

À ce stade, seuls les fragments ont été décrits. Il est ainsi nécessaire de progressivement ajouter des noeuds supplémentaires afin de les transformer en un segment complet.

- La première étape pour passer de la description de la classe au fragment est l'ajout d'un noeud servant à remplir les préconditions nécessaires au premier noeud décrivant la classe. Plus précisément, cette étape permet de créer les éléments scénaristiques qui vont permettre à la situation d'entraînement d'avoir lieu.

#### **Exemple avec la classe *Trier des blessés dans un environnement bruyant***

Dans le cadre d'un entraînement à la gestion des blessés arrivant du front par véhicule, l'apprenant doit savoir trier les blessés selon un protocole déterminé. Il doit notamment savoir faire cela dans un environnement bruyant où les communications sont parasitées très régulièrement par des bruits forts. Le fragment représentant la classe de situation correspondante est constitué des noeuds *Blessés nécessitant un tri*, le noeud représentant l'action *Tri de blessés* ainsi que le stressor *Environnement bruyant*.

À cette étape, le planificateur ajoutera le noeud *Arrivée de blessés* afin de remplir les préconditions à la réalisation du noeud *Blessés nécessitant un tri*. Le planificateur sera libre de déterminer le moyen mis en place permettant l'arrivée des blessés ainsi que le type d'environnement bruyant selon les moyens qu'il est possible de représenter dans l'environnement dédié. Ici, il pourra par exemple faire arriver ces blessés par ambulance (*Arrivé de blessé en ambulance*) ou encore en hélicoptère (*Arrivée de blessé en hélicoptère*).

Le planificateur a donc la possibilité de faire varier les scénarios au travers des choix des préconditions si ces dernières ne sont pas spécifiées par la classe de situation.

- Dans un second temps, le planificateur devra ajouter les noeuds correspondant aux conséquences de la tâche effectuée par l'apprenant. Pour cela, il devra s'appuyer sur les effets du dernier noeud représentant la classe de situation.

### **Intégration d'effets d'annonce**

Nous avons créé des scénarios à partir des classes de situations en suivant un processus de construction en plusieurs étapes, s'appuyant sur des heuristiques simples et un système de conditions. Toutefois, ces scénarios ne tiennent compte que d'une théorie narrative structurelle. Par conséquent, les scénarios ainsi élaborés ne présentent pas d'éléments purement scénaristiques qui pourraient intensifier le sentiment d'attente et de surprise chez le public, comme cela peut se produire dans une œuvre scénarisée. Autrement dit, notre objectif est d'ajouter des éléments qui renforceront la tension narrative du scénario.

Dans le cadre d'un entraînement, nous devons donc disposer d'un procédé permettant de :

- Créer une logique au sein du scénario dans l'enchaînement des situations ;
- Entraîner l'apprenant à être attentif à ce qui l'entoure ;
- Prévenir de l'effet de tunnelisation de l'apprenant sur sa tâche ;
- Permettre à l'apprenant de faciliter son immersion dans une histoire scénarisée.

Pour cela, nous avons exploité deux théories narratives permettant l'intégration d'effets d'annonce, à savoir est un procédé narratif consistant à annoncer à l'avance un événement important ou une révélation qui va se produire plus tard dans l'histoire. Ces théories sont la **théorie du fusil de Tchekov** ainsi que le **foreshadowing**.

### Fusil de Tchekov

Principe narratif stipulant qu'un objet ou un élément introduit dans une histoire doit être nécessaire et pertinent pour l'intrigue ultérieure. Ce principe met en avant l'importance de chaque élément d'un scénario, et souligne l'importance de la cohérence narrative.

Nous proposons également d'utiliser le foreshadowing comme seconde théorie permettant d'exploiter et de modifier la tension narrative.

### Foreshadowing

Principe narratif utilisé dans toute forme d'art narratif pour donner un indice de ce qui va se passer ultérieurement dans l'intrigue. Le foreshadowing peut prendre de nombreuses formes, telles que des révélations subtiles ou des indices évidents, qui permettent de donner une idée de ce qui va se passer plus tard dans l'histoire. Il peut également être utilisé pour créer de la tension ou encore du suspens en laissant entendre un potentiel danger à venir.

Bien que similaire au principe du fusil de Tchekhov, cette théorie diffère par rapport à la notion d'obligation introduite par la théorie du fusil. En effet, alors que le principe du fusil de Tchekhov stipule que chaque élément dans une histoire doit être nécessaire et avoir une fonction, que ce soit pour l'intrigue, la caractérisation ou l'atmosphère, le foreshadowing, quant à lui, consiste à donner des indices subtils sur les événements à venir dans le but de susciter de l'anticipation chez le lecteur.

### Exemple

Dans VICTEAMS, l'un des scénarios d'entraînement demande à l'apprenant d'effectuer un calcul de dose de médicament à injecter tout en étant plongé dans le noir, suite à l'explosion d'un générateur à cause d'un éclair pendant un orage. Cette situation a été introduite par le biais d'un foreshadowing ainsi que d'un fusil de Tchekov :

- Pour mettre en place le fusil de Tchekov, deux personnages non joueur discute entre eux, proche de l'apprenant, des risques d'un orage sur l'infrastructure électrique.
- Pour mettre en place le foreshadowing, l'apprenant peut entendre l'orage s'approcher et de plus en plus grondant au fil du temps.

Nous proposons de distinguer les deux concepts dans leur traitement que nous en ferons dans notre approche.

Pour clarifier ces deux approches, nous mettrons l'accent sur la notion d'explicitation de l'information :

- Nous utilisons le principe du fusil de Tchekhov pour donner des informations de manière explicite à l'apprenant, par le biais de dialogues ou d'éléments mis en évidence ;
- Nous utilisons le principe du foreshadowing pour donner des indices de manière implicite à l'apprenant, par le biais de l'environnement, du son ou d'éléments qui ne sont pas mis en évidence.

Dans notre système, nous avons intégré les deux théories en ajoutant des noeuds représentant les éléments obligatoires permettant d'initier les intrigues ou les indices dans les segments qui précèdent l'élément que nous voulons mettre en avant. Dans notre cas d'application, l'élément à mettre en avant est lié aux classes de situations que nous voulons entraîner.

Ainsi, lorsque nous créons un scénario, nous identifions les éléments nécessaires à la mise en place de la classe de situation, en nous référant au principe du fusil de Tchekhov. Nous ajoutons ensuite des noeuds qui représentent les indices sur le déroulement du scénario, conformément à la technique narrative du foreshadowing, afin de susciter de l'anticipation chez l'apprenant et de renforcer la tension narrative. Nous essayons ainsi d'entraîner l'apprenant aux compétences liées au *situation awareness*, qui sont l'ensemble des techniques mises en place afin de limiter les effets de tunnélisation de la tâche chez les apprenants en essayant de les pousser à rester alerte à leur environnement.

Ces noeuds peuvent être des événements, des actions ou des dialogues qui servent à préparer le terrain pour les éléments clés qui se produiront plus tard dans l'histoire.

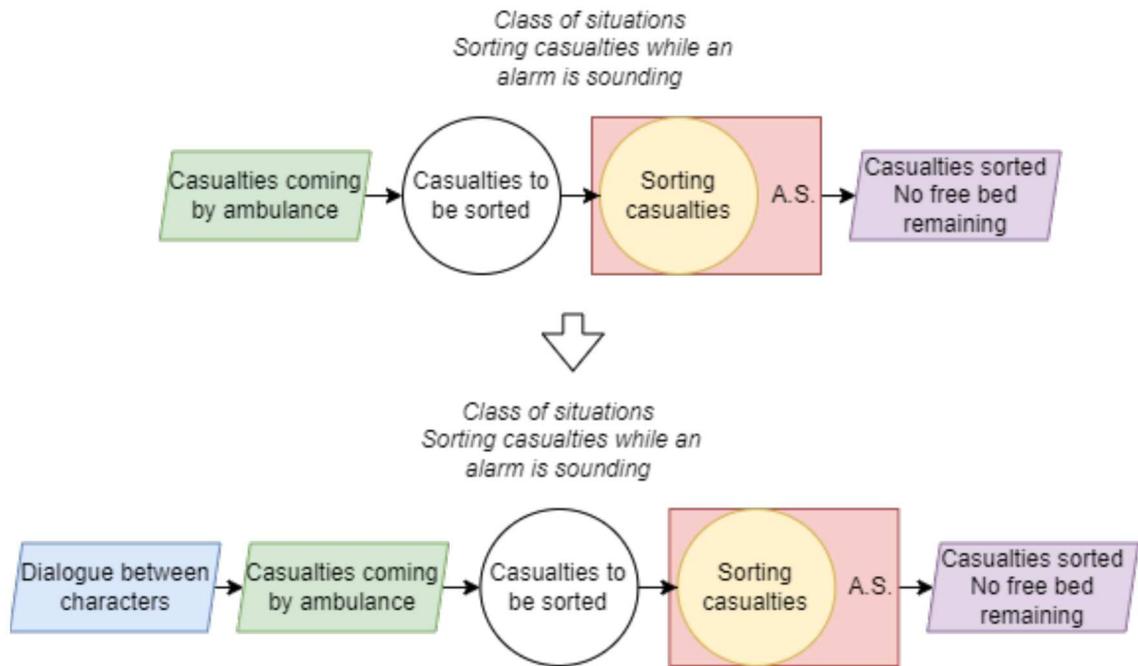


Figure 5.4 – Schématisation de l'intégration du foreshadowing par le biais d'un dialogue au sein de la représentation du segment. Ici, le dialogue permet de prévenir des causes de l'activation de l'alarme qui servira de stresser à la tâche métier.

Ces ajouts sont réalisés de manière purement arbitraire par le système, en s'appuyant sur un ensemble de noeuds qu'il est possible de créer.

### 5.3.3 Assemblage des segments narratifs

Une fois tous les segments narratifs créés, le système doit être capable de les combiner afin de proposer un scénario complet tout en respectant la théorie des contes du Gange. Pour rappel, cette théorie s'appuie sur le fait que la résolution d'une situation problématique entraîne une nouvelle complication à résoudre suite aux choix du héros.

Lors de l'assemblage des segments narratifs, le système doit donc être capable de lier le dernier nœud d'un segment avec le premier nœud du segment qui le suivra, tout en créant un lien de causalité entre les deux.

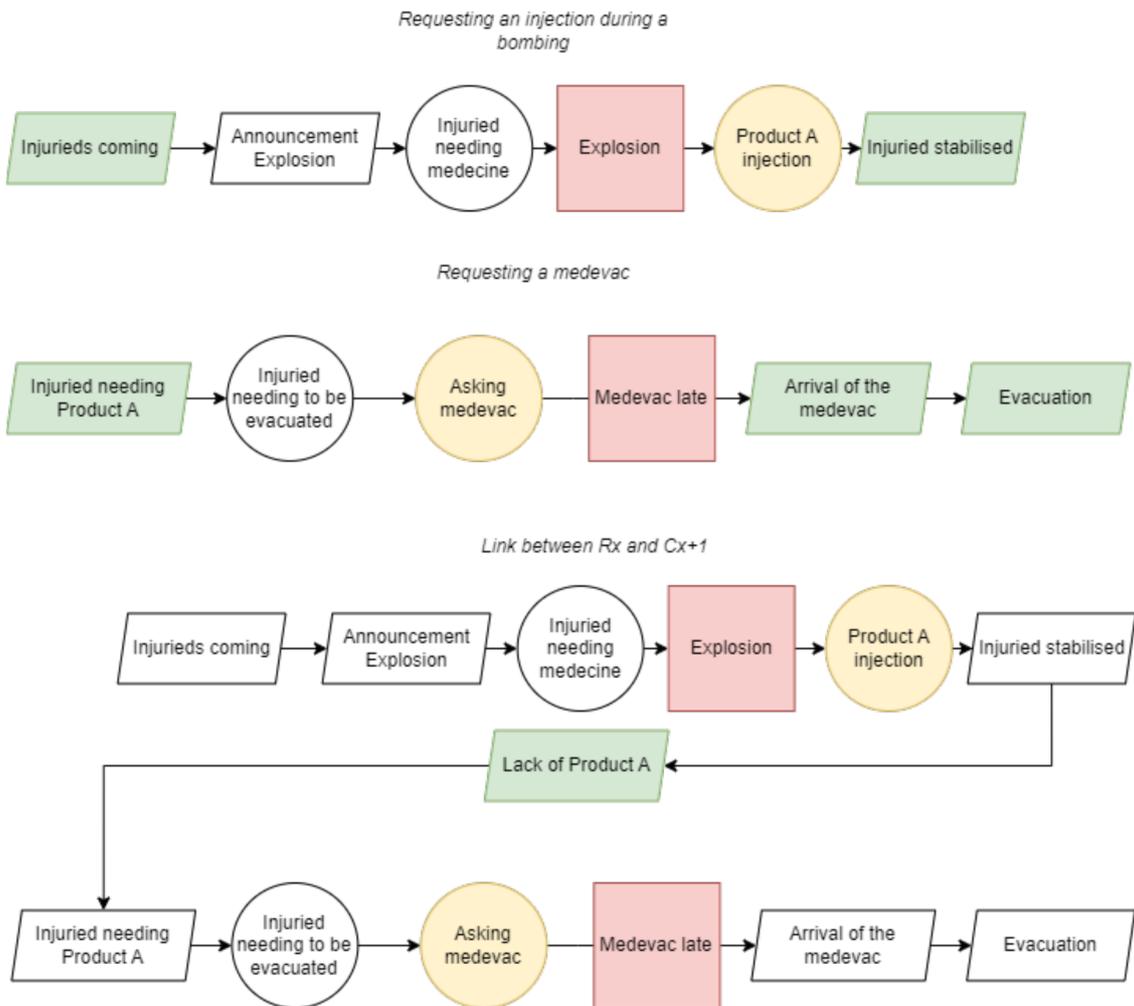


Figure 5.5 – Schématisation de la création du lien entre deux segments

Le système doit ajouter des nœuds pour créer des liens entre les segments narratifs. Plus précisément, il doit être capable de trouver un nœud qui satisfait les préconditions de  $C_{x+1}$  en s'appuyant sur les effets de la situation  $R_x$  parmi l'ensemble des nœuds qu'il peut ajouter. Ce nouveau nœud permettra de créer un lien de causalité entre le dernier nœud du segment précédent et le premier nœud du segment suivant. En d'autres termes, le nœud ajouté permettra d'expliciter la raison pour laquelle l'état du monde à la fin du premier segment mène à une situation problématique dans le segment suivant, en mettant en évidence la relation de cause à effet entre les deux. Ce lien de causalité est essentiel pour garantir la cohérence narrative du scénario dans le respect de la théorie des contes du Gange.

Une fois que les segments ont été reliés, le système doit effectuer les derniers ajustements pour proposer le scénario complet. Dans un premier temps, il doit s'assurer que la difficulté du scénario, liée à la tension narrative, est toujours croissante. Pour ce faire, le système doit vérifier que la difficulté de chaque segment, calculée à partir de la difficulté des fragments utilisés, est croissante. Si la difficulté de chaque segment n'augmente pas, le système devra ajuster la difficulté des fragments en utilisant des nœuds plus complexes.

Pour cela, il remplacera les nœuds existants par des homologues de difficulté supérieure, issus de classes de situations plus difficiles.

Une fois que les ajustements ont été effectués, le système doit vérifier que la difficulté du scénario continue d'augmenter de manière constante. Il est important de noter que cette vérification est nécessaire notamment si le système s'appuie sur des nœuds sélectionnés à l'aide de l'algorithme paramétrable, qui cherche parmi les voisins les plus proches d'une classe donnée. Dans ce cas, il est possible que la sélection de certains nœuds conduise à une stagnation de la difficulté, et il sera donc nécessaire d'effectuer des ajustements supplémentaires pour garantir une progression continue de la difficulté du scénario.

Enfin, le système devra ajouter les éléments nécessaires pour introduire et conclure le scénario. Selon la théorie des contes du Gange, cela implique l'ajout d'un élément décrivant l'état initial du monde ( $IA$ ), ainsi qu'une résolution finale qui ne génère plus de difficultés ( $R_F$ ). Dans le cadre d'un entraînement,  $IA$  correspond également à un briefing, tandis que  $R_F$  peut servir de debriefing.

#### Création du scénario - Résumé

En utilisant un modèle de noeuds représentant l'élément de description le plus petit du scénario, nous avons expliqué les différentes étapes de création d'un scénario qui repose sur la théorie des contes du Gange.

Le système suit plusieurs étapes clés pour assurer une cohérence narrative forte et une tension narrative toujours croissante, tout en vérifiant la génération du scénario une fois qu'il est assemblé.

En outre, le système intègre d'autres théories narratives telles que le fusil de Tchekov et le foreshadowing pour garantir une cohérence narrative importante.

## 5.4 Utilisation du scénario

Nous avons présenté un ensemble de règles de scénarisation visant à la mise en place d'un scénario interactif à travers l'utilisation d'un environnement virtuel, impliquant plusieurs principes de narratologie.

En plus de la définition des règles de planification du scénario, nous avons établis l'ensemble des règles des modifications possibles pouvant survenir pendant l'exécution de l'entraînement. Nous avons également spécifié le comportement adopté par le système lors de la mise à jour du profil une fois l'entraînement terminé.

Dans cette section, nous proposons d'étudier ces différents comportements.

### **5.4.1 Modification dynamique du scénario**

La modification dynamique du scénario fait référence à l'ensemble des processus permettant la modification du scénario en fonction du comportement et des actions de l'apprenant durant l'entraînement.

Au sein de notre approche, cette modification peut être réalisée selon deux méthodes : une aide à l'apprenant dans les cas où celui-ci serait bloqué lors de l'entraînement, ainsi qu'une adaptation de la difficulté lorsque celui-ci rencontre des difficultés.

#### **Aide à l'apprenant**

L'aide à l'apprenant fait référence à un ensemble de techniques visant à fournir des aides contextuelles à l'apprenant au sein de l'environnement virtuel, de manière diégétique, sans perturber son immersion ou son état de flow.

Pour fournir cette aide, nous nous appuyons sur le temps que prend l'apprenant pour exécuter la tâche qui lui est assignée et sur ses actions dans l'environnement. Nous examinons en particulier les actions de l'apprenant qui ne sont pas nécessaires pour effectuer la tâche.

Ainsi, nous proposons d'étendre la description des nœuds des classes de situation en y ajoutant un ensemble ordonné de sous-tâches à effectuer pour les terminer, pour les nœuds correspondant à une tâche. Cette extension permet au planificateur de suivre la progression de l'apprenant dans la tâche en vérifiant l'ordre d'exécution des étapes, plutôt que simplement la validation des applications des effets d'un nœud.

L'objectif est de fournir une aide contextuelle précise à l'apprenant pour l'assister dans l'étape qu'il est en train de réaliser. Pour créer cette aide diégétique, l'état du monde doit être accessible au planificateur pour déterminer les éléments utilisables pour créer l'aide contextuelle. Les personnages virtuels de l'environnement sont utilisés pour fournir cette aide sous forme de dialogue.

Les personnages virtuels peuvent également être utilisés pour débloquent complètement un apprenant qui ne peut pas avancer dans la tâche en effectuant l'action à sa place.

Cette aide à l'apprenant nécessite cependant un travail d'explicitation supplémentaire. Elle est donc facultative dans notre modèle et peut être remplacée par une aide extra-diégétique plus simple, comme l'aide du formateur.

#### **Gestion de la difficulté**

La gestion de la difficulté consiste à se baser sur une évaluation de la difficulté du segment du scénario que l'apprenant effectue, en vue de diminuer

la difficulté de l'ensemble du scénario. Cette approche permet de corriger une possible erreur de conception du scénario, qui peut notamment survenir lorsque les compétences de l'apprenant sont surévaluées, par exemple en raison de transferts de croyances erronées. L'objectif de cette aide est de ramener le niveau de difficulté du scénario à un niveau adapté aux capacités de l'apprenant, tout en maintenant un niveau de challenge suffisant pour maintenir l'état de flow de l'apprenant. En somme, il s'agit de maintenir l'apprenant dans un état de flow optimal en ajustant la difficulté de la tâche de manière à ce qu'elle soit toujours stimulante.

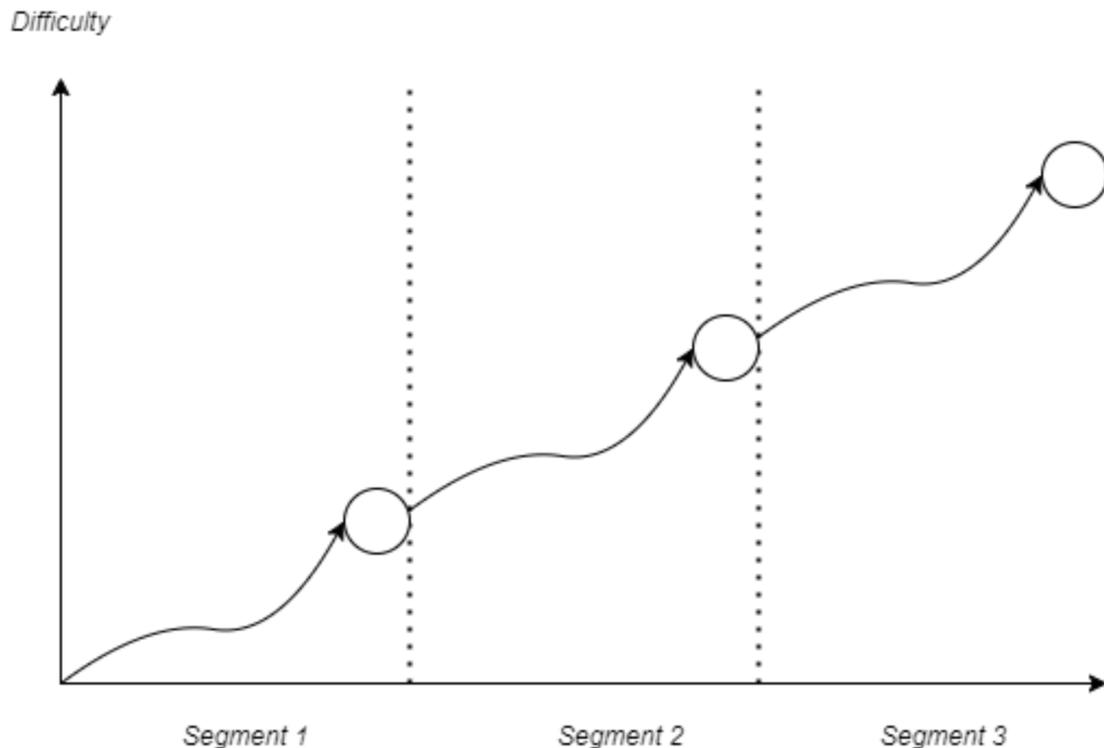


Figure 5.6 – Schématisation de la difficulté au travers d'un scénario utilisant trois classes de situation

Nous proposons deux types de gestion de la difficulté : l'une dynamique et calculée, l'autre purement arbitraire. Dans les deux cas, l'objectif d'une modification dynamique de la difficulté est de modifier la difficulté du segment en cours, puis de réévaluer la difficulté pour les segments suivants, afin de maintenir la cohérence narrative du scénario et de garantir un niveau de difficulté adéquat pour l'apprenant. Cette approche permet d'ajuster la difficulté de manière continue, en fonction de la performance de l'apprenant, afin de maintenir son engagement dans la tâche. Elle permet aussi de maintenir la théorie des contes du Gange.

- La méthode arbitraire consiste à diminuer la difficulté au minimum de la tâche en cours, puis de réévaluer la difficulté des segments suivants de manière croissante et linéaire en fonction du nombre de

segments restants. L'objectif est de modifier la difficulté afin de permettre à l'apprenant de terminer le scénario. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les capacités de l'apprenant, car elle diminue la difficulté au maximum. Si la difficulté est toujours trop importante, le scénario ne pourra pas continuer, car l'apprenant ne pourra pas effectuer la tâche même au niveau minimum de difficulté, même avec l'aide. Cette mesure permet donc de vérifier si l'apprenant a les capacités minimales pour réussir le scénario et d'alerter le formateur en cas de potentiel problème.

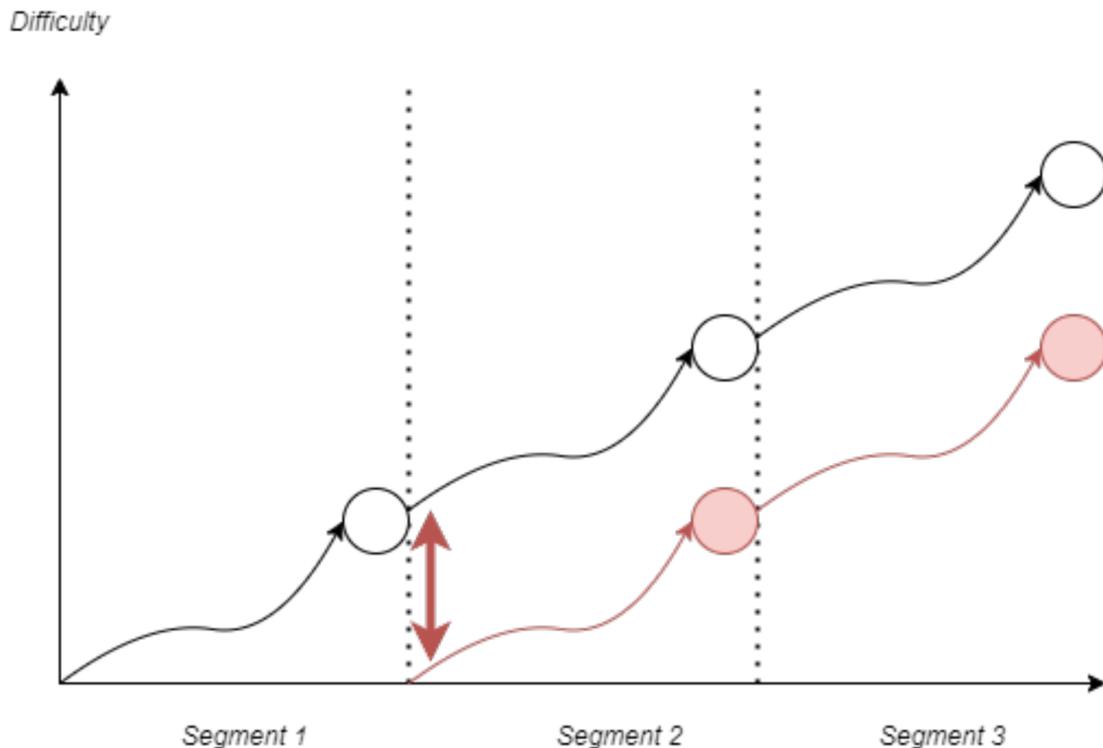


Figure 5.7 – Schématisation de la modification du scénario et de la difficulté de manière arbitraire

- La méthode de gestion de la difficulté calculée vise à adapter la difficulté de la tâche en cours de manière graduelle tout en maintenant un niveau de défi optimal pour l'apprenant, ce qui favorise son état de flow. Pour y parvenir, le planificateur doit être en mesure de proposer dynamiquement une nouvelle classe de situations ou bien de maintenir la même classe de situations tout en diminuant l'intensité du stresser ou en proposant une tâche moins complexe. Le but de cette méthode est de permettre à l'apprenant de toujours se sentir challengé tout en restant dans ses capacités d'exécution, favorisant ainsi son apprentissage.

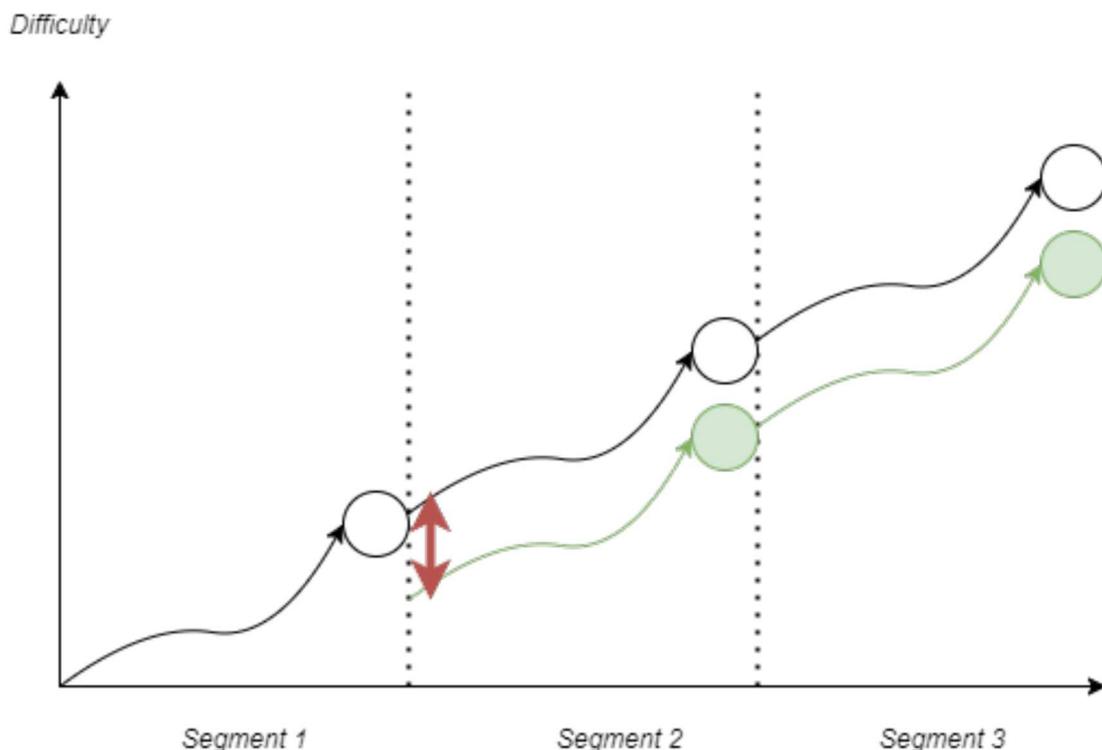


Figure 5.8 – Schématisation de la modification du scénario et de la difficulté de manière calculée

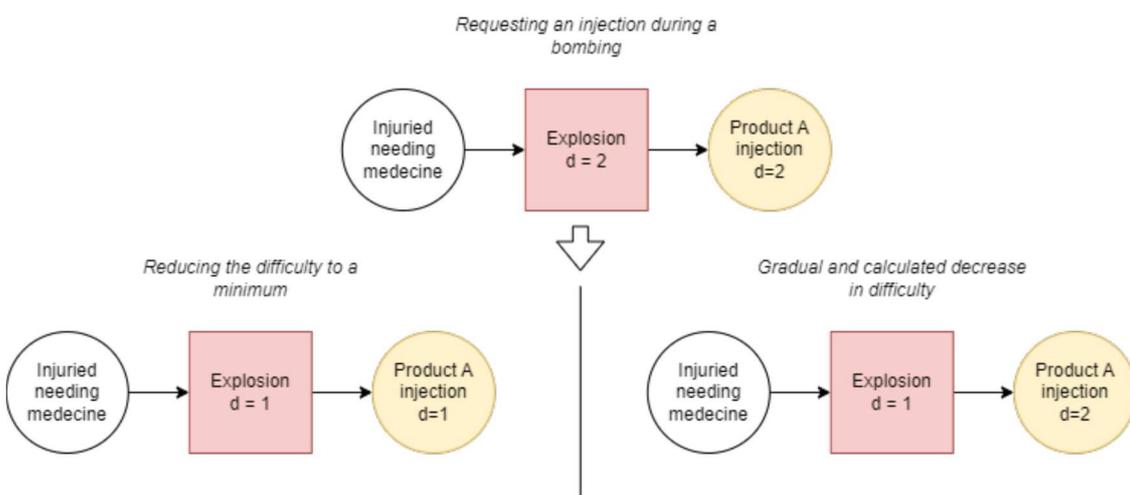


Figure 5.9 – Schématisation de la modification du scénario et de la difficulté selon la manière au niveau des classes de situation

Dans les deux cas, nous pouvons constater que la gestion de la difficulté ne se fait que de manière décroissante. Nous partons du postulat que la difficulté a été correctement sélectionnée par le système si l'apprenant réussit à effectuer la tâche. Cependant, il serait intéressant de vérifier que la tâche n'est pas trop facile pour l'apprenant. Pour cela, nous pourrions étudier

le temps d'exécution de la tâche et vérifier que celui-ci n'est pas anormalement bas. Une tâche effectuée trop rapidement peut en effet indiquer que la difficulté était sous-estimée et qu'une augmentation de la difficulté serait nécessaire pour maintenir l'apprenant dans un état de flow.

### 5.4.2 Mise à jour du profil de l'apprenant

Après l'entraînement, il est nécessaire de mettre à jour le profil de l'apprenant. Nous avons étudié deux approches pour faire évoluer le profil, l'une pendant l'exécution du scénario, l'autre à la fin de celui-ci, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Nous avons opté pour la méthode d'évolution du profil en parallèle de l'exécution du scénario, car elle permet de prendre en compte les changements éventuels de l'état des croyances au sein du profil lorsqu'un ajustement de difficulté est requis.

La mise à jour du profil pendant l'exécution de la tâche est effectuée lorsque l'apprenant termine le segment actif. La mise à jour prend en compte l'ensemble des données de l'environnement virtuel ainsi que les données physiologiques collectées par les capteurs. Pour cela, le profil crée de nouvelles croyances pour la classe de situation en cours à partir de ces données, puis les intègre au profil par une fusion comme décrit dans la partie sur la description du profil de stress.

Dans le cas d'un changement de difficulté ou d'une aide apportée à l'apprenant, le profil doit également être mis à jour pour ajuster les croyances relatives à la classe de situation dans laquelle l'apprenant a rencontré des difficultés. Dans ce cas, la masse de croyances devra refléter cet échec.

#### Utilisation du scénario - Résumé

Pendant l'exécution du scénario, le planificateur doit pallier les problèmes de conception qui n'avaient pas été anticipés lors de sa construction. Pour ce faire, plusieurs mécanismes sont mis en place afin de fournir une assistance à l'apprenant en difficulté et de permettre une modification en temps réel du scénario. Ces mécanismes tiennent compte à la fois de la diégèse du scénario et de la structure particulière des contes du Gange pour effectuer ces changements. Combinés à une mise à jour dynamique du profil de l'apprenant pendant l'exécution du scénario, ces mécanismes visent à maintenir l'état de flow chez l'apprenant et à lui proposer un entraînement lui permettant de développer ses capacités.

La mise à jour dynamique du profil est effectuée en fusionnant les anciennes croyances sur les classes de situations utilisées avec de nouvelles croyances. L'ensemble de cette conceptualisation permet de mettre en place un cycle complet, permettant à l'apprenant d'évoluer à chaque nouvel entraînement en s'appuyant sur ses expériences passées.

## **Troisième partie**

### **Mise en oeuvre et expérimentation**

Nous avons exposé la conception complète de notre modèle, détaillant les méthodes et modèles employés pour élaborer un profil individualisé et évolutif du niveau de stress de l'apprenant. De plus, nous avons décrit les règles de planification que nous avons créées pour garantir une tension narrative intense tout au long du scénario d'entraînement en situation de crise.

L'ensemble de ces concepts a été concrétisé par une mise en œuvre afin d'être utilisable et testable dans le cadre de plusieurs expérimentations.

Dans un premier chapitre, nous présenterons l'ensemble de la mise en œuvre des deux modules que nous avons conçus. Nous aborderons notamment les problématiques rencontrées pour leur implémentation, ainsi que les choix techniques qui ont été faits. Nous décrirons également le développement effectué sur le démonstrateur que nous avons utilisé.

Dans un second chapitre, nous traiterons de l'ensemble des expérimentations qui ont été menées pour valider notre modèle. Nous décrirons les hypothèses, les protocoles, ainsi que l'étude des différents résultats obtenus.

---

<b>6</b>	<b>Mise en oeuvre</b>	<b>102</b>
6.1	Implémentation du profil . . . . .	102
6.1.1	Gestion et représentation des stressseurs . . . . .	102
6.1.2	Interface graphique . . . . .	107
6.2	VICTEAMS2 . . . . .	112
6.2.1	Ajouts 3D . . . . .	112
6.2.2	Ajouts dans le moteur . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>119</b>
7.1	Profil . . . . .	119
7.1.1	Hypothèses . . . . .	119
7.1.2	Protocole . . . . .	120
7.1.3	Résultats - Formulaire de pré-expérimentation . . . . .	127
7.1.4	Résultats - Données de l'environnement virtuel . . . . .	129
7.1.5	Résultats - Étude statistique . . . . .	131
7.1.6	Résultats - Discussions . . . . .	138
7.2	Scénarisation . . . . .	141
7.2.1	Hypothèses . . . . .	141
7.2.2	Protocole . . . . .	141
7.2.3	Résultats - Formulaire de pré-expérimentation . . . . .	144
7.2.4	Analyse post-expérimentation . . . . .	144
7.2.5	Résultats - Discussions . . . . .	146

---

# Chapitre 6

## Mise en oeuvre

Dans ce chapitre, nous allons aborder les réalisations que nous avons faites pour valider notre approche. Nous présenterons notamment les interfaces spécifiques développées pour le profil de stress, ainsi que les choix techniques que nous avons dû faire concernant la représentation des stressseurs et des masses de croyances. Nous évoquerons également les diverses avancées qui ont abouti à une nouvelle version de VICTEAMS répondant à nos besoins fonctionnels.

### 6.1 Implémentation du profil

Dans cette section, nous aborderons les choix effectués lors du développement du profil de stress de l'apprenant. Nous commencerons par présenter la base de données utilisée pour représenter l'ensemble des connaissances, puis nous discuterons du développement de l'interface graphique conçue pour la visualisation du profil.

#### 6.1.1 Gestion et représentation des stressseurs

L'ensemble de la représentation des stressseurs dans l'environnement virtuel a fait l'objet d'une conception minutieuse afin de pleinement tirer partie de notre modèle de représentation.

Afin de pouvoir assurer la réutilisation de l'environnement et de l'ensemble des stressseurs dans d'autres contextes d'étude, nous avons séparé en deux parties distinctes la représentation informatique d'un stressseur et sa gestion au sein de l'environnement virtuel.

La représentation informatique d'un stressseur consiste en une liste d'évènements à déclencher dans l'environnement virtuel afin de le simuler. Elle diffère de la représentation théorique que nous en faisons.

### Exemple de représentation informatique du stresser *Explosion* sous forme de JSON

```

1 {
2   "name": "explosion_strong",
3   "instruction": {
4     "playSound": "explosion_sound",
5     "playSound": "tinnitus_sound",
6     "playEffect": "explosion_flash",
7     "changePNJBehaviour" : "panic"
8   }
9 }

```

Cependant, cette représentation à elle seule ne permet pas de déterminer les différents liens que nous voulons établir entre les stressers, notamment dans le cadre de la représentation sous forme de taxonomie.

Afin de choisir la méthode de représentation, nous avons fixé une liste de besoins fonctionnels à remplir :

- Permettre d’extraire une représentation sous forme de taxonomie ;
- Permettre de stocker des données ;
- Permettre le calcul de la similarité sémantique entre les différents noeuds ;
- Permettre la génération dynamique d’éléments.

Nous avons identifié plusieurs méthodes permettant de représenter cette taxonomie.

Finalement, notre choix s’est porté sur l’utilisation d’un système de gestion de base de données non relationnel nommé Neo4j.

Neo4j est un système de gestion de base de données orienté graphe spécifiquement conçu pour le stockage et la manipulation de données structurées sous forme de graphes. Contrairement aux bases de données relationnelles classiques qui reposent sur des tables et des relations entre ces tables, ce système utilise des structures de graphe composées de nœuds, de relations et de propriétés.

Les données sont représentées en utilisant un modèle de graphe où les nœuds représentent des entités distinctes et les relations décrivent les connexions ou les liens entre ces entités. Chaque nœud et chaque relation peuvent également être associés à des propriétés qui permettent de stocker des informations supplémentaires et des attributs spécifiques.

Ce modèle de données flexible nous offre de nombreux avantages, notamment la capacité à représenter notre structure complexe et inter-connectée, ainsi qu’à effectuer des requêtes et des analyses sémantiques sur nos données.

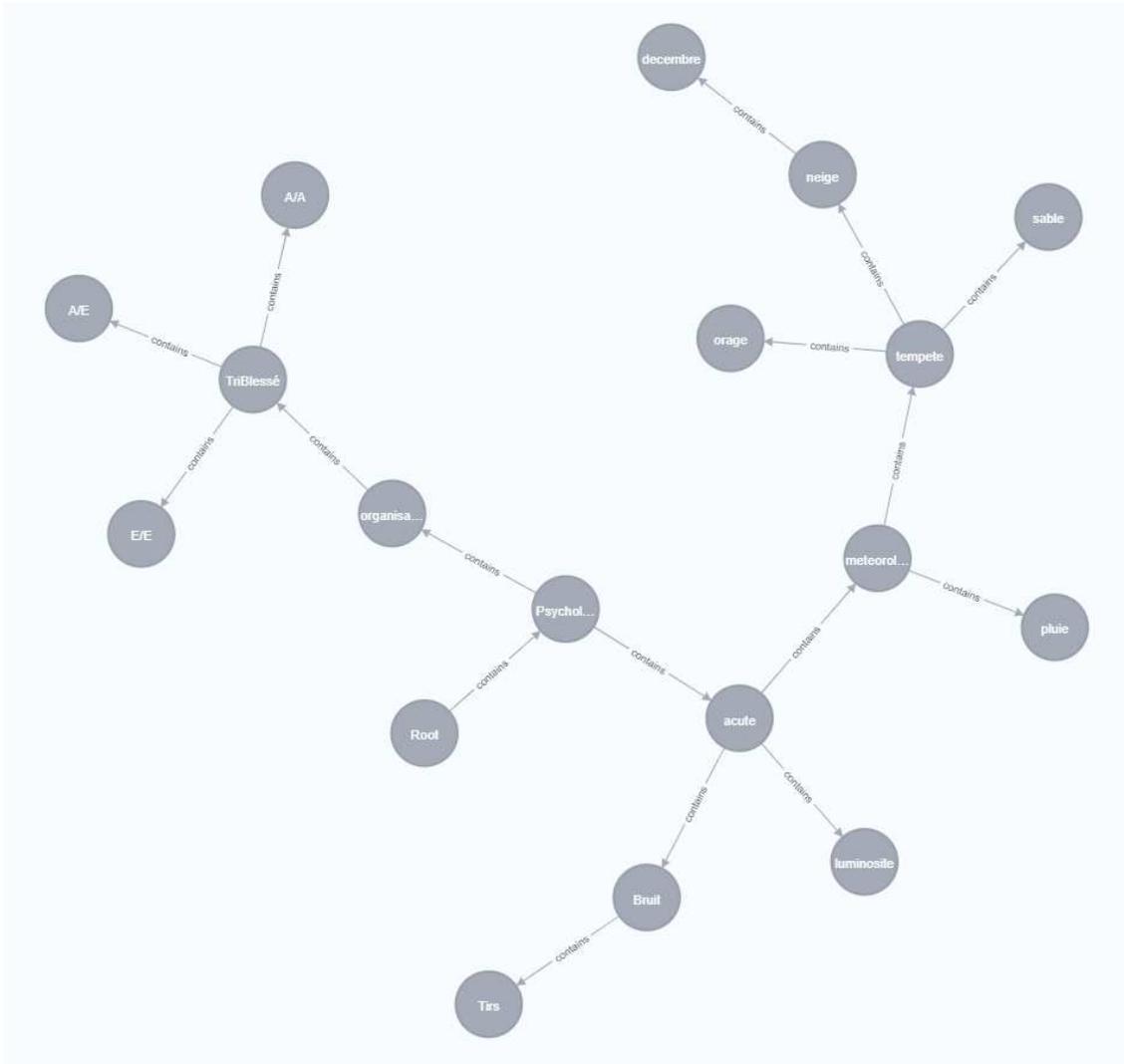


Figure 6.1 – Représentation de la taxonomie sous forme de graphe Neo4j

Détaillons les différentes relations que nous représentons dans cette base.

### Stockage des stresseurs

La principale fonctionnalité est la représentation et le stockage des différents stresseurs, et la création des liens taxonomiques entre eux.

Grâce au système de représentation basé sur des nœuds de Neo4j, nous sommes en mesure de représenter directement la taxonomie telle que nous l'avons établie.

Dans le but de faciliter les calculs ultérieurs, nous distinguons les nœuds qui seront des feuilles, représentant ainsi des stresseurs individuels, des nœuds qui représentent des groupes de stresseurs.

Grâce à la possibilité de stocker des informations sous forme de propriétés sur les nœuds, chaque nœud de stressueur est associé à sa représentation

en JSON comme décrit auparavant.

### Création dynamique des classes de situation

La flexibilité de Neo4j et la capacité à établir des liens entre plusieurs nœuds nous permettent de représenter de manière dynamique les différentes classes de situations dans la base de données, et ce de manière instantanée.

Cette caractéristique est l'une des principales raisons qui nous ont poussés à choisir cette technologie pour la représentation. Ainsi, nous sommes en mesure de représenter l'ensemble des classes à n-dimensions qui peuvent être créées à partir des différents nœuds, sans avoir à spécifier intégralement chacune d'entre elles à la création de la base. De plus, nous avons fait le choix de représenter uniquement les classes qui ont fait l'objet d'un entraînement, et donc qui possèdent une masse de croyance.

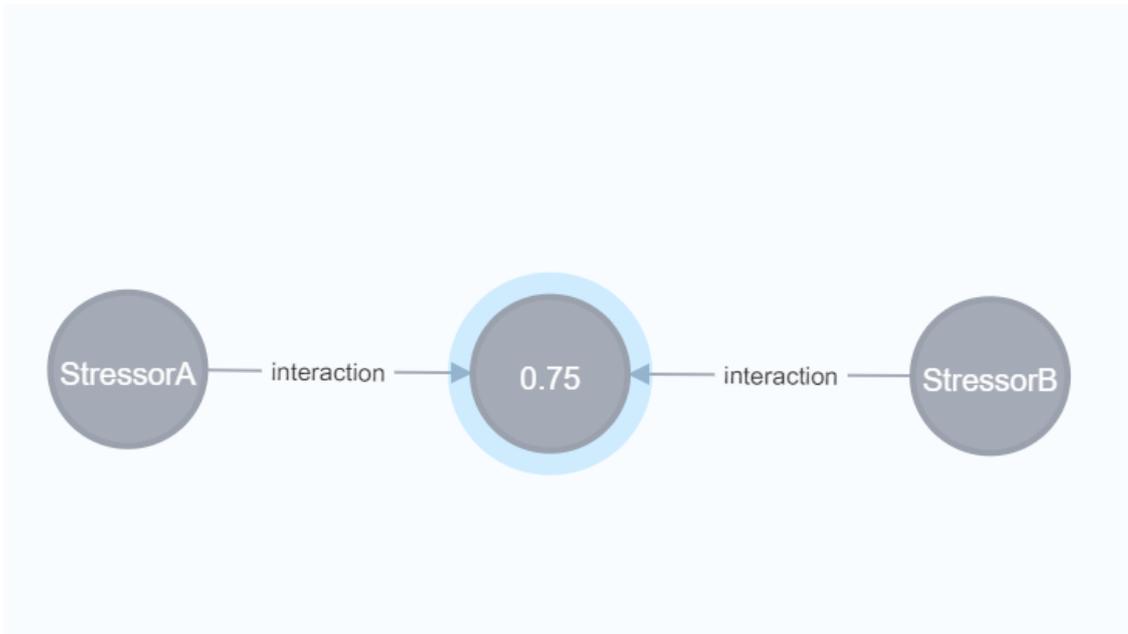


Figure 6.2 – Représentation dynamique d'une classe de situation mettant en jeu les stressors A et B et comportant une masse de croyance

Cette approche nous permet d'optimiser l'espace de stockage requis pour la base de données, ce qui n'était pas possible avec les autres systèmes de représentation que nous avons envisagés.

Ainsi, nous créons de nouveaux nœuds pour représenter chaque classe de situations. Chaque stressor associé à cette classe est relié à celle-ci par une relation pondérée en fonction de la difficulté du stressor.

### Stockage des masses de croyances

Grâce à cette représentation des classes de situations et à la possibilité d'évaluer les arcs qui relient le nœud représentant la classe de situation entre eux selon leur difficulté, nous sommes en mesure de stocker directement la masse de croyance associée à cette classe.

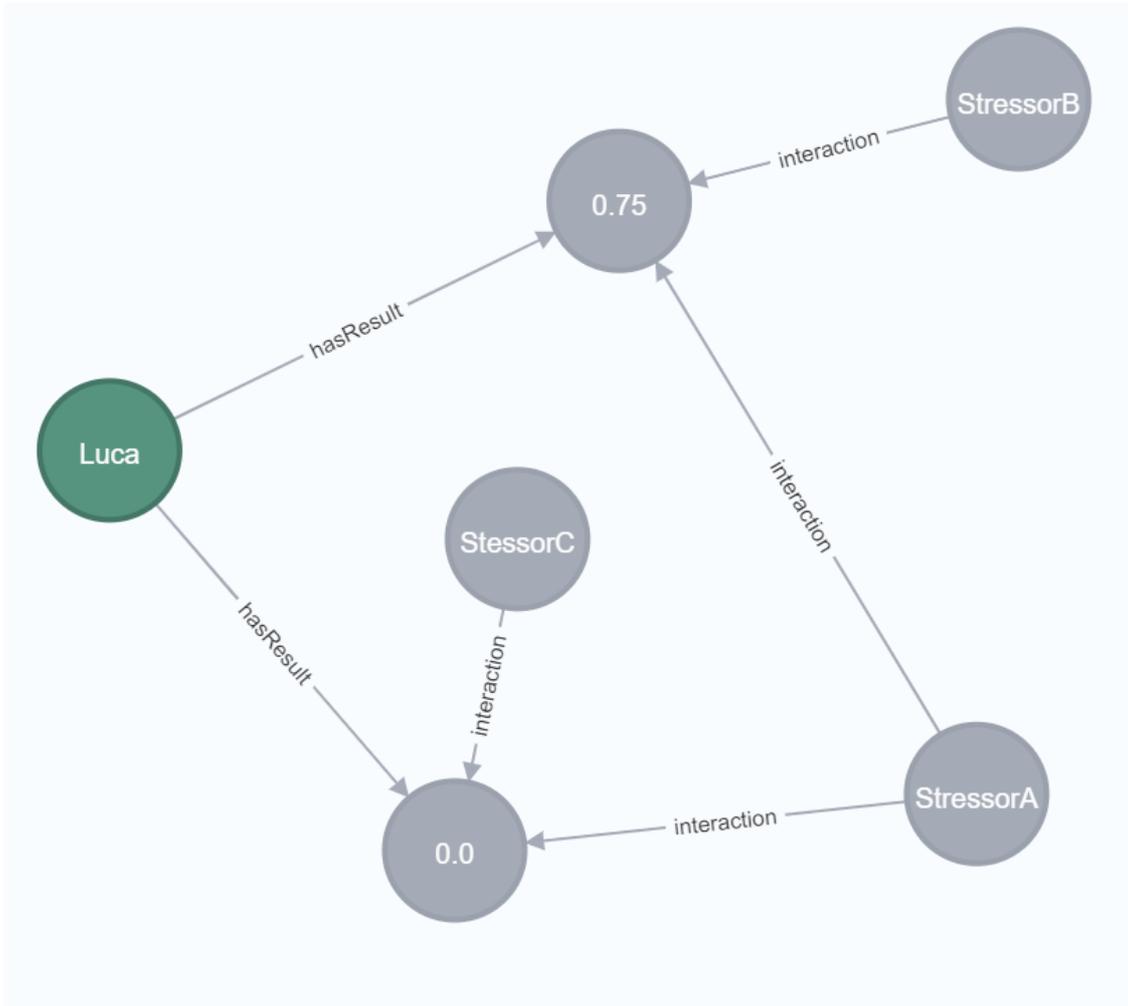


Figure 6.3 – Représentation d'un profil ayant des résultats sur deux classes de situation entre trois stressseurs lambda

### Données calculées et fonctions de propagation

Grâce aux différentes requêtes possibles avec le langage de requête interne du système de représentation appelé Cypher, il est également possible de déterminer directement la proximité sémantique entre deux nœuds de la base de données grâce aux commandes intégrées au système de gestion de la base de données.

De plus, nous pouvons utiliser directement Cypher pour déterminer le comportement de la propagation au sein du système de représentation. Ainsi,

la propagation des croyances est automatisée dès lors qu'un nœud représentant une classe de situation est créé ou mis à jour.

### 6.1.2 Interface graphique

Nous avons mis en place une interface graphique permettant au formateur de suivre l'évolution du profil de ses différents apprenants et d'agir sur l'ensemble de la taxonomie et des classes de situations.

Afin de répondre aux besoins d'utilisation sur plusieurs systèmes d'exploitation, l'interface graphique complète est déployée localement en utilisant l'extension .NET du langage de programmation C++, offrant un accès à l'interface via n'importe quel navigateur Internet. De plus, l'ensemble des fonctions et méthodes liées à la création ou la modification du profil sont également accessibles via une API déployable en plus de l'interface graphique. Ainsi, il est possible d'intégrer l'ensemble du profil de l'apprenant dans une autre application qui ne dépend pas de notre interface graphique.

Cette interface se divise en deux parties distinctes :

- Une partie dédiée à la visualisation du profil d'un apprenant ;

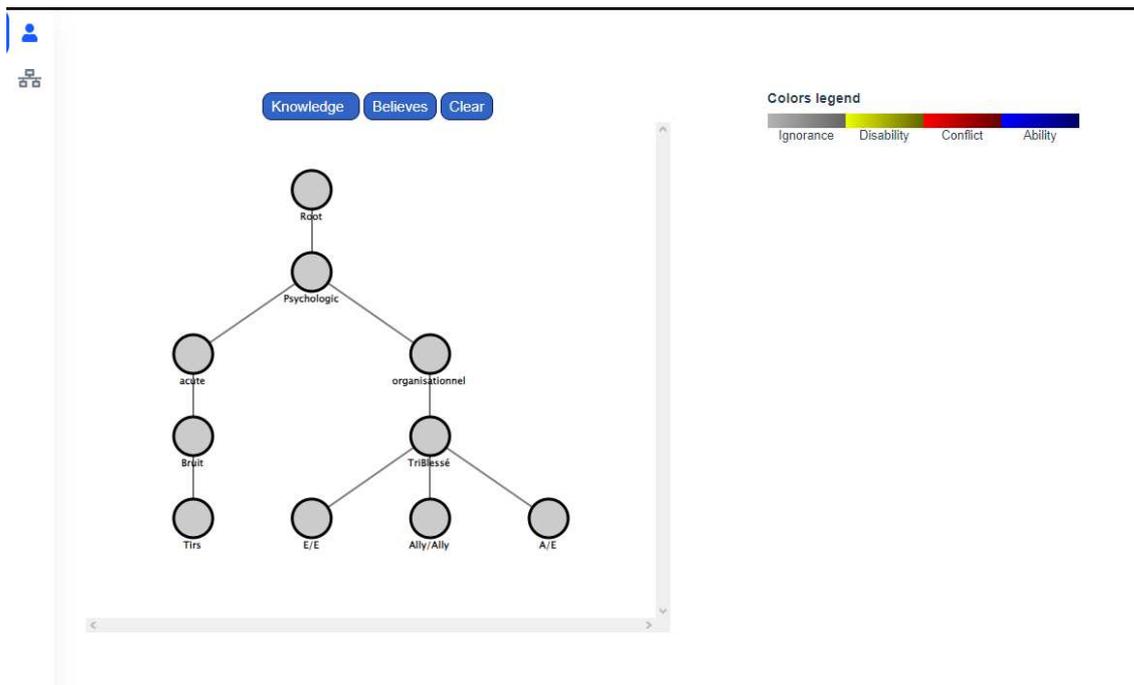


Figure 6.4 – Visualisation du profil d'un apprenant dans l'interface graphique

- Une partie permettant la création et la modification de l'ensemble de la taxonomie.

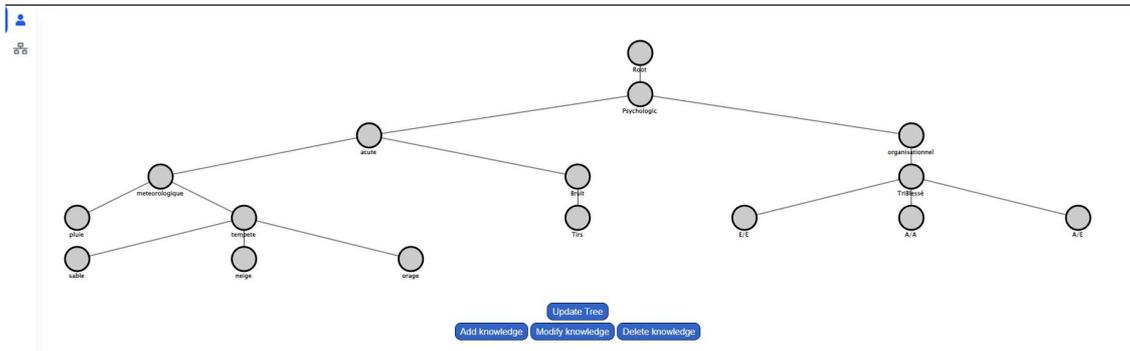


Figure 6.5 – Visualisation de la taxonomie dans l’interface graphique

Le développement de ce prototype d’interface a été réalisé par des étudiants que nous avons supervisés. Le développement a également été fait en collaboration avec un formateur.

### Profil

Afin de permettre au formateur de suivre l’évolution du profil de ses apprenants et de lui donner la possibilité d’agir sur ces profils, nous avons dû concevoir et mettre en place une interface facilitant ses actions. La principale difficulté réside dans la nécessité d’offrir une compréhension rapide et simple des différentes fonctionnalités de l’interface grâce à des éléments d’interaction clairs.

La partie profil est elle-même divisée en deux sous-parties distinctes.

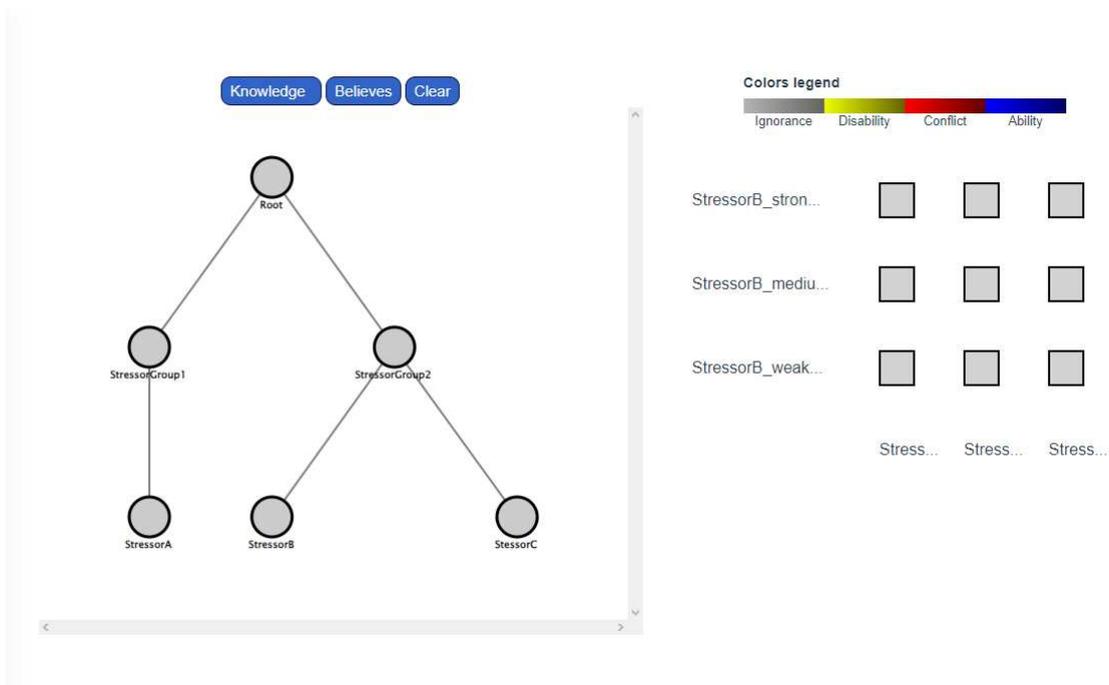


Figure 6.6 – Profil de l’apprenant, composé de deux partie distinctes

La partie gauche permet de visualiser l'ensemble des nœuds de la taxonomie, offrant ainsi au formateur la possibilité de sélectionner les nœuds à utiliser pour déterminer une classe de situations spécifique directement depuis la représentation interactive.

Elle permet aussi de visualiser l'ensemble des masses de croyances liées à l'apprenant sous forme de graphe Neo4J.

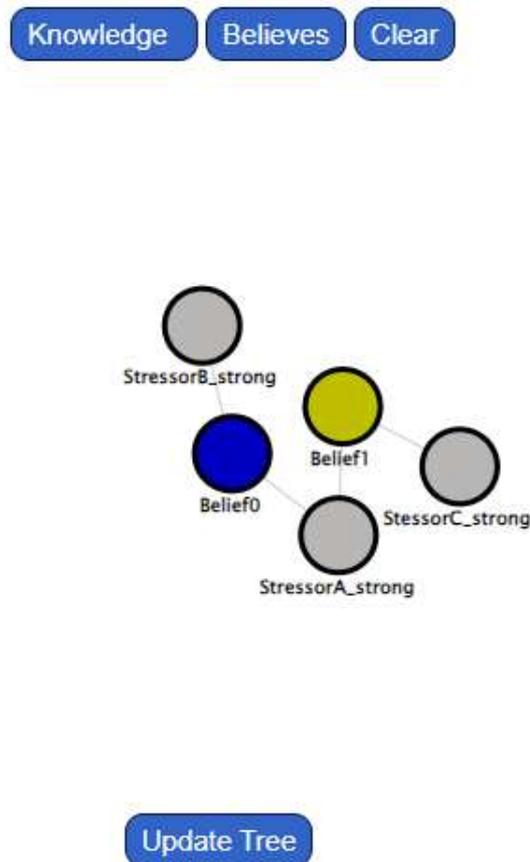


Figure 6.7 – Visualisation des classes de situation déjà entraînées d'un apprenant

De plus, la représentation permet de visualiser directement les conflits existant au sein du profil de manière calculée, réduisant ainsi l'espace de stockage nécessaire.

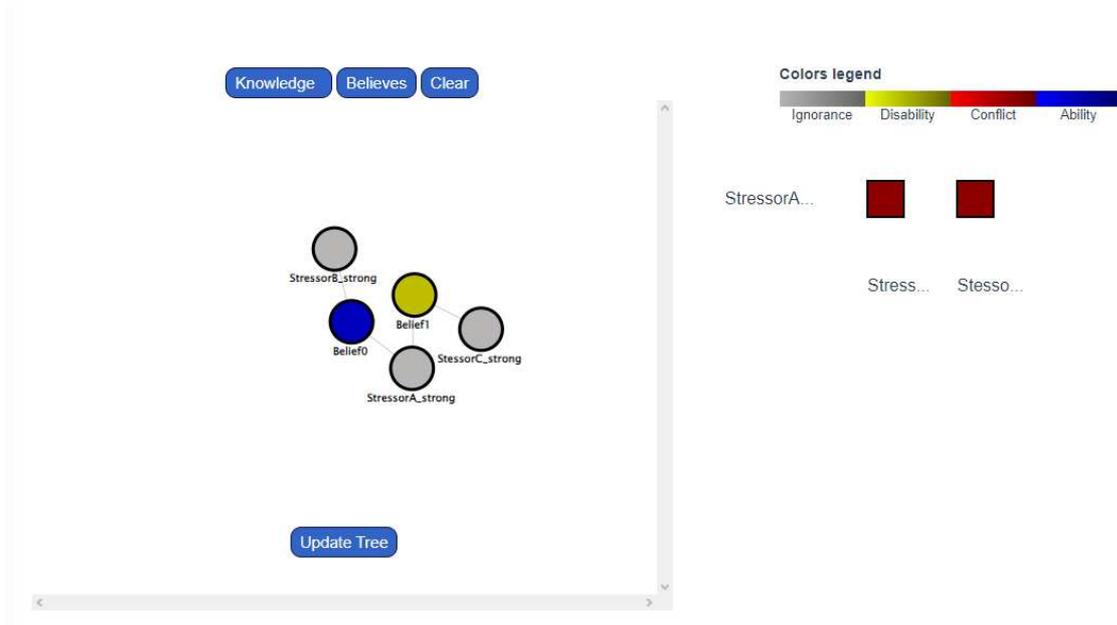


Figure 6.8 – Représentation du conflit créé entre deux classes de situation A, B et C

La partie droite permet au formateur de visualiser l'état des classes de situations sélectionnées dans la partie gauche.



Figure 6.9 – Visualisation d'une classe de situation particulière

Elle lui permet également de modifier manuellement une classe de situation en ajustant les valeurs de sa masse de croyance. De plus, elle offre la possibilité de sélectionner manuellement une future classe de situation à utiliser dans le cadre de l'algorithme de sélection des k plus proches voisins.

Figure 6.10 – Formulaire de modification de la masse de croyance d’une classe de situation

### Taxonomie

La seconde partie de l’interface concerne la visualisation et la modification de la taxonomie. Cette partie a été particulièrement complexe à concevoir, car une création ou une modification erronée de la taxonomie pourrait avoir des conséquences sur l’intégralité du système de propagation de la masse de croyance.

Grâce à cette interface, le formateur peut créer et modifier l’ensemble des nœuds de la taxonomie.

Figure 6.11 – Formulaire de création d’un nœud dans la taxonomie

Il peut également spécifier si le nœud qu’il ajoute sera une feuille, ce qui facilite l’automatisation des calculs de propagation des croyances.

The image shows a user interface for modifying a node in a taxonomy. At the top, there are four blue buttons: 'Add knowledge', 'Update Tree', 'Modify knowledge', and 'Delete knowledge'. Below these are three input fields: 'Knowledge to modify' with a dropdown menu showing 'A/A', 'New Name' with a text input containing 'Ally/Ally', and 'New Type' with a dropdown menu showing 'knowledge'. At the bottom center is a green 'Modify' button.

Figure 6.12 – Formulaire de modification d’un noeud dans la taxonomie

Afin d’assister le formateur, toutes les règles de construction de la taxonomie sont rappelées dans un menu contextuel accessible via un bouton d’aide.

## 6.2 VICTEAMS2

Dans le cadre de cette thèse, la première version de VICTEAMS ne pouvait pas accueillir toutes les spécificités techniques nécessaires à l’exécution de notre modèle. De plus, l’environnement ne permettait pas l’ajout d’éléments audiovisuels, indispensables pour représenter les stressseurs dans un environnement virtuel. Ainsi, cette environnement a été amélioré afin de servir de démonstrateur pour les différentes expérimentations que nous avons menées ainsi que d’environnement de tests pour notre contribution.

### 6.2.1 Ajouts 3D

Pour répondre aux divers besoins en termes de représentation, nous avons développé une seconde version de l’environnement, appelée VICTEAMS2, sous le moteur de jeu Unity.

VICTEAMS2 ressemble, à première vue, à sa version précédente. La principale modification visible lors de l’exécution de l’environnement est sa taille. Afin de pouvoir représenter plusieurs tâches métiers supplémentaires par rapport à la première version, la zone dans laquelle l’apprenant peut évoluer a été agrandie.

VICTEAMS2 a été doté des ajouts suivants :

- Deux tentes supplémentaires et une zone d’accueil pour une ambulance, permettant une gestion complète des tâches liées au tri des patients en fonction de la gravité de leurs blessures ;



Figure 6.13 – Capture d'écran d'une arrivée de patient dans VICTEAMS2

- Une annexe à la tente principale permettant de prendre en charge, dans l'environnement, les différentes tâches liées à la représentation et à la gestion des stocks de produits au sein de la tente principale ;



Figure 6.14 – Capture d'écran de l'annexe permettant la création de tâche autour de la gestion de stock dans VICTEAMS2

- Un hélicoptère permettant la mise en place des tâches d'évacuation d'urgence, d'évacuation sanitaire et de toutes les sous-tâches et complications qui peuvent en découler.

De plus, des éléments de gestion ont été ajoutés à VICTEAMS2, mais ils ne sont pas visibles par l'apprenant.

En particulier, un travail de spatialisation du son a été réalisé afin de

pouvoir étudier plus précisément la réponse de l'apprenant lors du déclenchement de stressseurs sonores.

Tous les menus contextuels liés aux nouveaux objets de l'environnement, ainsi que les menus apparaissant sur l'affichage tête haute de l'utilisateur, ont également été repensés et retravaillés pour permettre l'utilisation des nouvelles fonctionnalités.

## 6.2.2 Ajouts dans le moteur

Nous avons travaillé sur différentes méthodes pour intégrer toutes les exigences de représentation de notre approche dans l'environnement, ainsi que des méthodes pour agir directement sur celui-ci.

### Gestion des stressseurs

Nous avons choisi de diviser les tâches nécessaires à la création des stressseurs entre plusieurs gestionnaires (managers). Cela nous permet d'assurer une meilleure maintenabilité de notre code.

- Le premier gestionnaire, appelé *StressorsReader*, est responsable de l'interprétation des différentes étapes décrivant la mise en place du stressseur. Ce manager est donc en charge de la collecte des différents comportements d'un stressseur, stocké dans la base de donnée Neo4J sous forme de JSON. Il est également chargé de communiquer les actions à effectuer au deuxième gestionnaire ;
- Le deuxième gestionnaire, appelé *StressorsManager*, est responsable de la création des appels aux différentes fonctions de l'environnement permettant le déclenchement pas à pas du stressseur, ainsi que de la mise à jour de l'état du monde de l'environnement virtuel.

```
public void SwitchOffLight()
{
    TM.addRecordsLine("Lancement du stresser : SwitchOffLight");
    AM.PlayNord("EV_Explosion");
    Light[] ls = tente.GetComponentsInChildren<Light>();

    foreach(Light l in ls)
    {
        l.range = 4;
        l.intensity = 0.5f;
    }
}
```

Figure 6.15 – Exemple de code du stresser "Éteindre les lumière suite à une explosion" dans VICTEAMS2. Le stresser utilise la spatialisation du son intégré à l’environnement.

Grâce à cette division fonctionnelle, il nous est possible d’intégrer d’autres gestionnaires appelant le *StressorsReader* et le *StressorsManager*, ce qui permet notamment la représentation des scénarios ainsi que le pilotage manuel de l’environnement.

### **Gestion et représentation de scénarios d’entraînement**

De la même manière que pour la gestion et la représentation des stressers dans l’environnement, nous avons opéré un découpage fonctionnel de l’ensemble du processus d’exécution du scénario. De ce découpage ont été créés *ScenarioReader* et *ScenarioManager*.

- *ScenarioReader* est en charge d’interpréter les différentes étapes des scénarios créés par le module de scénarisation dynamique et de communiquer les différents événements à produire dans l’environnement;
- *ScenarioManager* est en charge d’appeler les différentes fonctions et autres managers permettant de produire les différents événements du scénario. Ils peuvent être des stressers, des mises à jour dans l’état du monde, ou encore la mise en place de tâches que l’apprenant doit exécuter.

```
public IEnumerator ScenarioDeux()
{
    dm.AddDocteur();
    dm.AddDocteur();
    yield return scenarioNodes.StartScenario();
    //yield return scenarioNodes.SpeechRadioNode("radio_extra");
    am.PlayOuest("EV_RAIN_30");
    yield return scenarioNodes.TriPatient(2, "Thunder");
    yield return scenarioNodes.TriPatient(10, "SwitchOffLight");
    yield return scenarioNodes.ChangeTent("", "");
}
```

Figure 6.16 – Exemple d’un scénario scripté dans l’environnement. Le scénario consiste en une suite de coroutine, assurant la bonne séquence des évènements.

La séquence des différents évènements du scénario est possible grâce au système de coroutine interne à Unity. Le rôle initial des coroutines est de créer des exécutions en arrière plan de l’environnement. L’avantage de ce système est qu’il permet l’exécution de plusieurs évènements en simultané dans l’environnement sans pour autant bloquer l’exécution globale. Il est également possible dans une fonction de marquer un temps d’arrêt dans son exécution tant qu’une coroutine appelée n’a pas terminé sa propre exécution.

À partir de cette spécificité, nous avons développé l’ensemble des tâches métiers exécutables dans l’environnement par l’apprenant. Nous avons également détaillé sous forme de coroutine différents évènements changeant l’état du monde, comme l’arrivée de véhicules.

```

//Noeud du scénario "TriPatient"
// int num : le nombre de tri successif
// string codeStressor : le code du stressor à appeler. null si aucun stressor ne doit être joué
public IEnumerator TriPatient(int num, string codeStressor)
{
    //Debug.Log("TriPatient commencé");
    int stressorIteration = Random.Range(num / 2, num);
    for(int i = 0; i < num; i++)
    {
        StartCoroutine(abma.ScenarioAmbulance()); // Arrivée ambulance animation + son
        // if (i == stressorIteration) sm.StressorLauncher(codeStressor);
        // Lancement du stressor à un moment semi aléatoire de la tâche. Le mieux serait d'appeler
        yield return new WaitUntil(() => abma.tri == AmbulanceManager.Etat.CHOIX_FAIT);
        // ICI appelle à la méthode en charge de provoquer un tri de patient, remplaçant le test avec
        Debug.Log("Tri " + abma.choix.Value + " fait"); //Depart Ambulance animation
        am.PlayNord("take");
        yield return new WaitUntil(() => abma.tri == AmbulanceManager.Etat.AMBULANCE_PARTIE);
        yield return new WaitForSeconds(Random.Range(10,15)); //On attend un nombre de secondes aléat
        //Debug.Log("Nouvelle Ambulance prête");
    }
    yield return new WaitForSeconds(1);
    //Debug.Log("Tri des " + num + " patients terminés");
}

```

Figure 6.17 – Exemple de code d’une tâche métier dans l’environnement. Il est possible d’ajouter en paramètre un stressor afin de jouer le script d’une classe de situation complète.

La résolution des événements clés du scénario pourrait ainsi se résumer en un appel de plusieurs coroutines consécutives par *ScenarioManager*.

Grâce à cette représentation, nous pouvons assurer que les événements d’un scénario s’exécuteront dans l’ordre prévu par le moteur de scénarisation dynamique. Elle nous assure également que l’environnement n’exécutera pas la suite du scénario tant qu’un événement ne s’est pas produit, ou que l’apprenant n’a pas terminé la tâche métier confiée.

### Pilotage de l’environnement

Afin de permettre au formateur d’agir sur l’environnement, nous avons également intégré un système de pilotage décentralisé de celui-ci. En effet, lors de l’entraînement, il est possible que l’apprenant ait besoin d’aide pour comprendre la tâche qui lui est demandée, obtenir des informations sur une situation ambiguë qui ne fait pas partie de la tâche qu’il doit accomplir, ou pour tout autre besoin. Nous avons donc envisagé une méthode permettant au formateur d’agir directement sur l’environnement virtuel.

Ce système de pilotage permet au formateur d’effectuer les actions suivantes :

- Déclencher des stressors ;
- Déclencher des événements ;
- Créer des tâches métiers ;
- Créer des aides pour l’apprenant.

Afin de ne jamais interrompre l'exécution de l'environnement et de garantir que l'apprenant puisse être isolé lors de son entraînement, le tableau de pilotage de l'environnement est décentralisé.

Toutes les commandes de contrôle ont été créées via une API pouvant être intégrée dans d'autres applications. Ainsi, nous assurons la maintenabilité de ce système. Dans notre approche, l'API est utilisée par l'application web permettant la visualisation du profil de l'apprenant par le formateur.

# Chapitre 7

## Expérimentation

Dans ce chapitre nous allons aborder les différentes méthodes que nous avons mises en place afin de valider le fonctionnement de nos différents modules. Cette validation s'est faite selon plusieurs expérimentations que nous avons pu mener.

Ces expérimentations ont aussi pour but de répondre à nos différentes hypothèses que nous avons présenté dans l'introduction de ce mémoire.

Pour chaque module, nous décrirons le protocole expérimental, les différentes hypothèses que nous avons cherché à valider ainsi que les résultats que nous avons obtenus.

### 7.1 Profil

Dans le cadre de notre travail de conception du profil, nous avons réalisé une expérimentation afin de valider ou non son fonctionnement. Dans cette section, nous détaillerons les caractéristiques de cette expérimentation en réalité virtuelle. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus.

#### 7.1.1 Hypothèses

L'objectif de l'expérimentation sur le profil est de déterminer sa capacité à prédire avec précision l'état de stress de l'apprenant. Plus précisément, nous souhaitons évaluer la capacité du profil à fournir une évaluation précise des différents niveaux de stress dans les situations d'apprentissage. Nous devons également vérifier sa capacité à fusionner correctement plusieurs sources de données et à prédire avec précision l'état d'une classe de situations non évaluée qui est similaire à une classe déjà évaluée. En d'autres termes, nous souhaitons confirmer que le profil est capable de distinguer de manière précise les classes de situations incluses dans la ZPD, la ZDA ou exclues de ces deux ensembles.

Ainsi, les différentes hypothèses que nous cherchons à démontrer dans cette expérimentation reflètent les questions relatives au fonctionnement de notre module de représentation du stress :

- H1 : Le module est capable de calculer correctement une masse de croyances suite à une évaluation en environnement virtuel ;
- H2 : Le module est capable de fusionner correctement plusieurs masses de croyances provenant de modalités différentes ;
- H3 : Le module est capable de prédire correctement l'état d'une compétence similaire à une autre déjà étudiée.

### 7.1.2 Protocole

Le protocole a été conçu afin de vérifier ces différentes hypothèses, en prenant en compte les aspects techniques de notre profil ainsi que les contraintes organisationnelles qui ont émergé suite aux restrictions sanitaires pendant la période d'évaluation.

Dans un premier temps, nous devons déterminer l'ensemble des tâches qui sont nécessaires à la validation de nos hypothèses. Le type d'expérimentation menée nous informera également sur le nombre de personnes nécessaires afin de constituer notre population de sujets.

Afin de valider nos hypothèses, nous avons besoin à la fois de nourrir le profil initial, et de vérifier que le profil effectue une bonne prédiction de l'état de compétence du sujet.

Notre objectif est de vérifier ainsi que, au bout de plusieurs passages, la prédiction du profil s'avère être fiable. Plus précisément, nous allons devoir entraîner les sujets sur une classe de situations particulière, puis vérifier que la prédiction du profil est correcte quant à la maîtrise du sujet dans une classe de situations proche de celle sur laquelle il s'est entraîné.

Nous avons choisi de mettre en place une étude utilisant l'analyse de la variance ou ANOVA afin de valider nos hypothèses [Potvin and Schutz, 2000]. Plus précisément, nous avons fait le choix d'utiliser une ANOVA à mesures répétées intra-sujet, du fait que nos échantillons sont dépendants. Cette méthode statistique est utilisée pour analyser les données lorsque plusieurs mesures sont effectuées sur les mêmes sujets dans différentes conditions ou à différents moments. On parle également d'étude en crossover.

Nous définissons donc deux hypothèses : l'hypothèse nulle, qui stipule qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes dépendants, et l'hypothèse alternative, qui postule qu'il existe une différence significative entre les groupes dépendants.

Notre expérimentation portera sur un ensemble de quatre mesures distinctes :

- La première mesure ne sera pas utilisée, car elle est soumise à de nombreux éléments variables que nous ne souhaitons pas prendre en compte dans notre expérimentation : la découverte de la tâche et le premier contact avec l'environnement virtuel. Cette première mesure servira ainsi de phase de découverte pour les sujets.
- Les deuxième et troisième mesures permettront d'alimenter le profil en données et de mettre en évidence l'effet d'apprentissage de la tâche.
- La dernière mesure permettra de valider ou d'invalider l'hypothèse sur la capacité du profil à faire une bonne prédiction.

Chaque mesure sera espacée dans le temps de sept jours. Les trois premières mesures porteront sur la même tâche et la même condition expérimentale, ce qui nous permettra de tester la validité des hypothèses 1 et 2. La quatrième mesure, quant à elle, portera sur la même tâche mais avec une condition expérimentale différente, nous permettant ainsi de tester la validité de notre hypothèse 3. Nous nous attendrons ainsi à voir une différence entre les mesures 2 et 3, et les mesure 3 et 4.

Désormais, détaillons étape par étape les différents éléments du protocole.

### **Population**

GPower est un logiciel statistique largement utilisé dans la recherche scientifique pour effectuer des calculs de puissance et de taille de population.

En utilisant GPower, et en le paramétrant selon les données de notre expérimentation, nous sommes en mesure de déterminer le nombre de participants nécessaire pour que notre expérimentation soit statistiquement valide en vue de notre ANOVA à mesures répétées, en nous donnant notamment le nombre de participants nécessaires afin de rejeter l'hypothèse nulle. Par convention, nous avons cherché à obtenir une puissance statistique de 80 %.

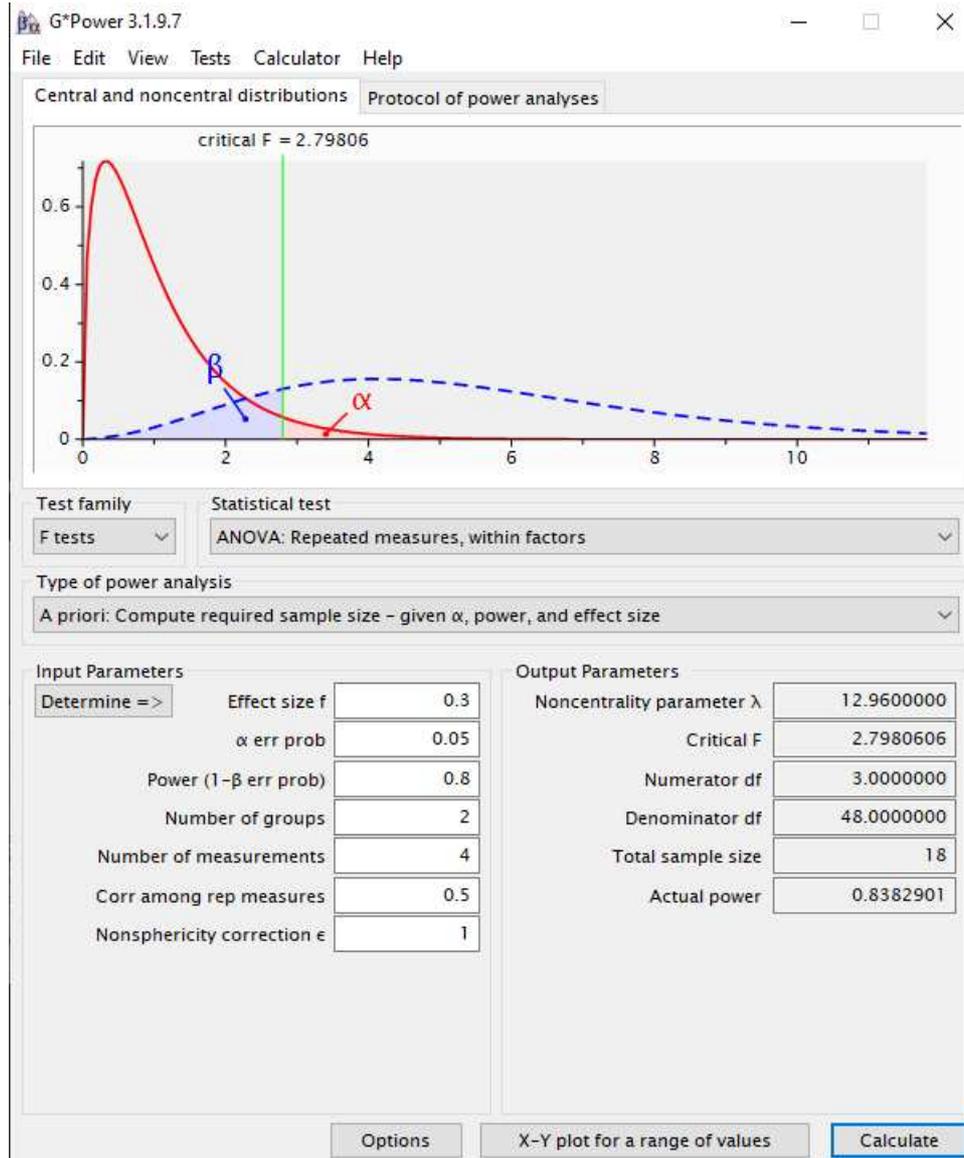


Figure 7.1 – Calcul du nombre de participants à l’expérimentation nécessaire selon les paramètres de notre expérimentation.

Le logiciel nous permet de déterminer que le nombre minimum de participants requis est de 18 afin de pouvoir rejeter l’hypothèse nulle avec environ 83 % de probabilité.

L’expérimentation a été ouverte à une population plus large que le personnel médical, en raison des restrictions imposées par l’épisode de Covid-19 et de l’impossibilité d’effectuer ces tests auprès de personnes issues du milieu médical militaire.

Les critères d’exclusion sont les suivants :

- Personnes mineures ;
- Personnes atteintes de tachycardie ou de bradycardie ;
- Personnes atteintes de cinétose ;

- Personnes atteintes d'épilepsie ;
- Personnes atteintes de maladies cutanées.

### **Tâche**

L'expérimentation, conçue pour un public non-initié aux pratiques médicales militaires, a été adaptée afin de proposer une tâche la plus inclusive possible.

Pour chaque mesure, nous avons opté pour une tâche de calcul mental utilisant les données disponibles dans l'environnement virtuel VICTEAMS2. Le sujet évolue dans un avant-poste médical avancé lors d'un orage, où six patients alités présentent des données physiologiques affichées sur un écran situé près de leur lit.

La tâche consiste en dix calculs mentaux successifs, devant être réalisés dans un temps imparti de 45 secondes pour chaque calcul :

- Toutes les 45 secondes, l'un des patients alités devient bleu ;
- Le sujet doit repérer le patient devenu bleu, puis effectuer une multiplication et une soustraction en se basant sur les données affichées à proximité du patient bleu.
- Le sujet doit renseigner, à l'aide d'un menu dédié, l'emplacement du patient bleu ainsi que le résultat obtenu suite à ses calculs mentaux ;
- En cas d'erreur ou lorsque le temps imparti est écoulé, une alerte sonore est émise et un personnage virtuel informe le sujet de son erreur. En revanche, si la réponse est correcte, une autre alerte sonore est émise pour indiquer au sujet le bon résultat.

L'objectif principal de cette expérimentation est de vérifier le bon fonctionnement du profil de stress. Afin de générer un stimulus stressant et de l'intégrer au profil, une situation stressante est introduite au cours de la moitié des calculs mentaux. Cela se traduit par l'obscurité soudaine de l'environnement virtuel, accompagnée d'un bruit d'explosion et d'acouphènes.

La tâche comporte donc un aspect cognitif important, en tant qu'exercice mental de calcul et qu'exercice de repérage dans l'espace.

### **Matériel**

Afin d'alimenter le profil de stress de l'apprenant, il est nécessaire d'effectuer des mesures physiologiques pour évaluer l'état de stress du sujet.

À cette fin, nous avons utilisé deux capteurs physiologiques pour déterminer l'état de stress du sujet. Plus précisément, nous avons utilisé :

- Un capteur d'électrocardiographie réglé sur une fréquence d'échantillonnage de 256 Hz. (voir Figure 7.2)



Figure 7.2 – Unité électrocardiogramme Shimmer3 utilisée lors des travaux sur le profil de stress de l'apprenant

- Un capteur d'activité électrodermale réglé sur une fréquence d'échantillonnage de 128 Hz. (voir Figure 7.3)

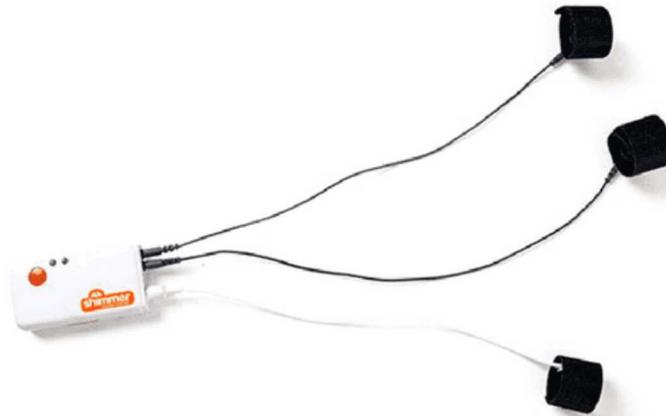


Figure 7.3 – Unité électrodermale Shimmer3 utilisée lors des travaux sur le profil de stress de l'apprenant

Les deux capteurs ont été utilisés simultanément avec le logiciel "Consensus-Pro" fourni par le fabricant. Ils ont été synchronisés localement sur l'ordinateur de capture à l'aide d'une base centrale fournie avec les capteurs, connectée via USB3. La synchronisation s'effectue par le biais d'une connexion Bluetooth RN42 de classe 2.



Figure 7.4 – Base Shimmer3 utilisée lors des travaux sur le profil de stress de l'apprenant

Pour le matériel de réalité virtuelle, nous avons équipé les sujets de casques HTC Vive Pro à connections filaires, ainsi que des deux manettes fournies avec l'appareil. Le son du casque intégré a été fixé afin de ne pas dépasser les 80 dB lors de la diffusion du stresser pendant l'exécution de la tâche.



Figure 7.5 – Casque de réalité virtuelle Vive Pro utilisé pour l'expérimentation

L'ordinateur utilisé possède les spécifications suivantes :

- Microsoft Windows 10 Business edition x64 ;
- Processeur : i9-9920X @ 3.5 GHz ;
- Mémoire : 64 GB (RAM) ;
- Carte graphique : Nvidia GeForce RTX2080 Ti.

Une CleanBox CX a été utilisé afin de désinfecter le matériel de réalité virtuelle ainsi que les capteurs après chaque passage au moyen d'une désinfection à la lumière UV.

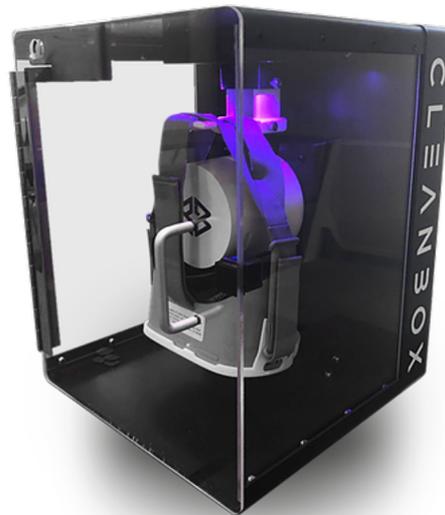


Figure 7.6 – CleanBox CX

## Procédure

Chaque mesure se déroule selon la procédure suivante :

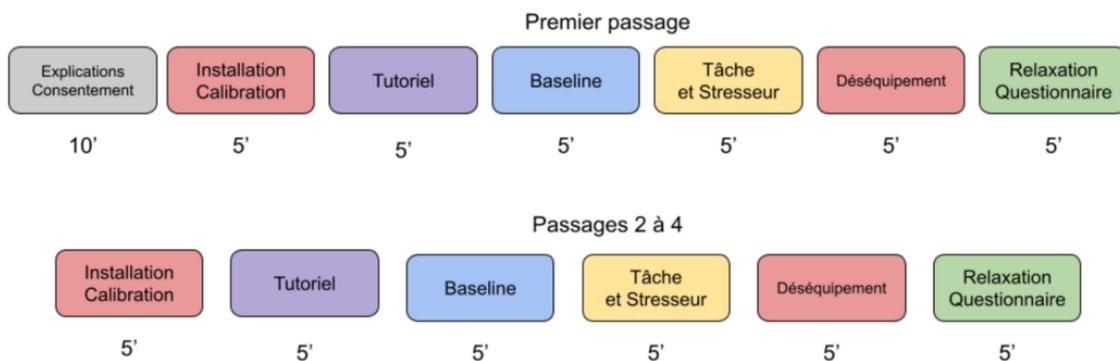


Figure 7.7 – Déroulé de la procédure d'expérimentation pour chaque passage

Chaque mesure est espacée dans le temps de sept jours. Chaque mesure débute par une mesure de baseline, qui représente la valeur de base et attendues des capteurs lorsque l'état du sujet est considéré comme normal et stable. Cette baseline permet ainsi de comparer l'état stable du sujet avec les différents états captés lors des différentes phases de stimulation de l'expérimentation.

Lors de la mesure de la baseline, le sujet est placé dans un environnement virtuel représentant une plaine sous un ciel étoilé, et est accompagné d'une musique permettant sa relaxation.

La phase de tâche est séparée en deux parties :

- Une phase de contrôle, où le sujet effectue la tâche sans stimulation. Ici, le but de la phase est d'obtenir des données sur les changements comportementaux et physiologiques face à la tâche et ce sans stress.
- Une phase de stress, où le sujet effectue la tâche après la stimulation du stresser. Le but est d'obtenir des données sur les changements comportementaux et physiologiques une fois le sujet stressé.

Chaque passage se termine par une suite de questions issues des questionnaires STAI-6 et NASA-TLX [Souchet et al., 2022b]. Au début du premier passage, un questionnaire d'informations est aussi complété ainsi que d'autres questionnaires permettant de percevoir l'état d'anxiété et de stress du sujet.

### 7.1.3 Résultats - Formulaire de pré-expérimentation

Les formulaires de pré-expérimentations nous offrent la possibilité de détecter les profils ou les individus qui pourraient biaiser les résultats de l'expérience. En identifiant ces facteurs perturbateurs potentiels à l'avance, nous pouvons prendre des mesures pour les écarter ou les contrôler de manière adéquate, garantissant ainsi que les résultats obtenus sont plus fiables et représentatifs de la population cible.

De plus, ces formulaires de pré-expérimentations nous permettent également de créer des profils de stress initiaux. En soumettant les participants à certaines questions ou scénarios spécifiques avant le début de l'expérience, nous pouvons établir une ligne de base concernant leur niveau de stress ou d'autres variables pertinentes. Cela nous donne un point de référence pour évaluer comment l'expérience elle-même peut influencer ou modifier ces niveaux de stress au fil du temps.

#### Répartition

Nous avons réalisé cette expérimentation auprès de 20 sujets d'une moyenne d'âge de 22,89 ans. 97 % de la population est étudiante.

Êtes-vous une femme, un homme, non genré ?

20 réponses

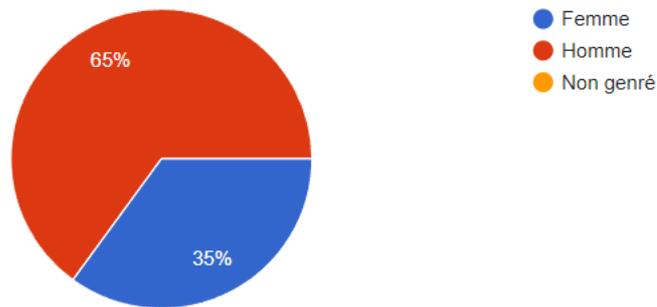


Figure 7.8 – Répartition selon le genre des sujets

Sur ce panel, la majorité des sujets ne possèdent pas de casque de réalité virtuelle. Cependant, uniquement 21,1 pour cent n’ont jamais utilisé de casque de réalité virtuelle.

Possédez-vous un casque de réalité virtuelle ?

20 réponses

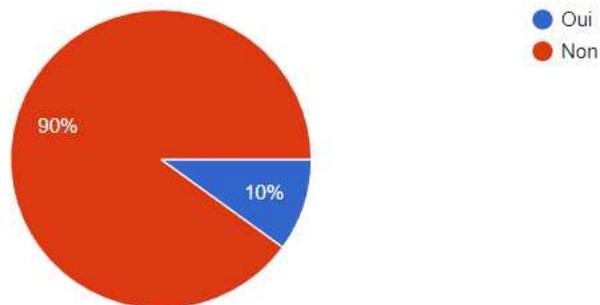


Figure 7.9 – Répartition selon la possession de matériel de réalité virtuelle

### Questionnaire *STAI-Y - Inventaire d'anxiété Trait*

Nous utilisons le questionnaire STAI-Y Trait pour mesurer l’anxiété des sujets. Nous avons sélectionné ce questionnaire pour sa structure en seulement vingt question, ainsi que son utilisation dans bon nombre d’études du stress, ce qui en fait un questionnaire de choix. Le questionnaire effectue l’inventaire de l’état d’anxiété général du sujet [Spielberger, 1970]. Nous n’utilisons pas le questionnaire STAI-Y État, destiné à détecter l’anxiété étatique chez le sujet, qui est une anxiété à liée à la situation présente, et qui ne nous permet pas d’écarter les sujets pouvant altérer les résultats du fait d’une anxiété générale trop importante.

### **Questionnaire *Freiburg Mindfulness Inventory short***

Nous utilisons le Freiburg Mindfulness Inventory short [Walach et al., 2006] pour mesurer le niveau de pleine conscience chez les individus, notamment la présence attentive, l'acceptation et l'engagement dans l'instant présent. Ce test nous permet d'éliminer de l'étude les différents sujets qui seraient en trop grande maîtrise de leur stress et qui n'expriment pas ses effets, et qui seraient en trop grande maîtrise d'eux en présence d'une situation d'urgence.

### **Questionnaire *Perceived Stress Scale***

Nous utilisons le Perceived Stress Scale [Cohen et al., 1994] pour évaluer la perception générale que les individus ont du stress, c'est-à-dire la mesure dans laquelle ils considèrent leur vie comme imprévisible, incontrôlable et surchargée. Il se concentre sur la perception subjective du stress, ce qui permet d'obtenir une évaluation globale du niveau de stress vécu par un individu sur une période de temps donnée. Ce test nous permet également d'éliminer de l'étude les différents sujets ressentant trop de stress en général.

Après avoir minutieusement examiné les résultats des différents pré-questionnaires remplis par les participants, nous avons conclu qu'aucun sujet de l'expérimentation ne devait être exclu de l'étude statistique. En analysant attentivement les données recueillies, nous n'avons identifié aucun cas présentant des caractéristiques ou des réponses aberrantes qui pourraient biaiser les résultats de l'analyse. Par conséquent, tous les sujets ayant participé à l'étude ont été pris en compte dans notre analyse statistique, ce qui renforce la représentativité et la validité de nos conclusions.

### **Questionnaire sur les stressseurs**

Nous avons élaboré un questionnaire pour évaluer la perception des individus à l'égard de différents facteurs de stress présents dans notre environnement virtuel. Ce questionnaire vise à déterminer le profil initial du niveau de stress de chaque participant en tenant compte des stressseurs spécifiques qui se manifestent dans le contexte virtuel.

#### **7.1.4 Résultats - Données de l'environnement virtuel**

Nous avons effectué une étude de l'évolution des résultats de la tâche proposée aux sujets en fonction des différents passages. Plus précisément, nous avons déterminé une liste de données calculées que nous analysons entre les passages pour chaque sujet. Nous comparons les données de la phase de contrôle avec celles de la phase de stress.

Les données que nous analysons sont les suivantes :

- D1 : le nombre de réponses à la tâche correctes et fausses ;
- D2 : le nombre de fois où le délai de réponse a été dépassé ;
- D3 : le temps de réponse moyen entre la phase de contrôle et dans la phase de stress pour chaque passage ;
- D4 : la différence du temps de réponse moyen entre les passages pour chaque phase ;
- D5 : la différence du temps de réponse moyen entre le passage 1 et le passage 4.

Temps réponse Moyen			Delta Passage		
Passage 1			Passage 1		
Avant Stresseur	Après Stresseur	Total	Avant Stresseur	Après Stresseur	Total
35,5	37,6	36,66666667	-	-	-
Passage 2			Passage 2		
Avant Stresseur	Après Stresseur	Total	Avant Stresseur	Après Stresseur	Total
24,5	22,83333333	23,5	-11	-14,76666667	-13,16666667
Passage 3			Passage 3		
Avant Stresseur	Après Stresseur	Total	Avant Stresseur	Après Stresseur	Total
35,75	23	28,1	11,25	0,166666667	4,6
Passage 4			Passage 4		
Avant Stresseur	Après Stresseur	Total	Avant Stresseur	Après Stresseur	Total
27,25	25,66666667	26,3	-8,5	2,666666667	-1,8
Dif. entre Av/Ap Stresseur					
Passage 1		2,1			
Passage 2		-1,666666667			
Passage 3		-12,75			
Passage 4		-1,583333333			
Dif moyenne Psg1/Psg4					
10,36666667					

Figure 7.10 – Exemple des données calculées dans le cadre de l'étude des données de l'environnement virtuel

Nous utiliserons le test de l'ANOVA répétée sur ces données séparément, afin de pouvoir évaluer si la moyenne des différents passage est la même en analysant la variance pour l'ensemble de ces données.

Les deux hypothèses nous permettant d'effectuer ce test sont valides sur les données D3, D4.

Les données D1 et D2 se révèlent être peu pertinentes. En moyenne, les résultats de la tâche sont hauts à chaque passage, et le nombre de délais dépassés en moyenne est bas.

Pour les données D3, D4, le test nous permet de rejeter l'hypothèse nulle à plus de 95 %. Ainsi, le test nous permet de déterminer qu'il y a des différences significatives entre les différents passages en moyenne. Détaillons pour chaque type de données les résultats :

- D3 : le temps moyen de réponse par passage entre les phases de contrôle et de stresser diminue en moyenne chez les sujets.
- D4 : le temps moyen de réponse entre les passages entre les phases de contrôle et de stresser diminue en moyenne chez les sujets.

L'analyse de D5 ne peut être faite par le test de l'ANOVA répétée, car D5 ne représente que la différence moyenne entre le premier et le dernier passage. En faisant la moyenne de l'ensemble des sujets de D5, on remarque que le temps de réponse moyen du passage 4 est inférieur à celui du passage 1. Nous avons également comparé l'évolution entre les passages 2 et 3, 3 et 4 et 2 et 4, grâce à un test de Student, afin de vérifier s'il existe des paires de passages avec une différence significative. On constate une différence significative entre les passages 2 et 4, les sujets étant bien plus rapides à répondre en moyenne au dernier passage.

### Conclusion de l'analyse des données de l'environnement virtuel

Les résultats de notre expérimentation montrent une évolution entre les passages 2 à 4, comme attendu. Nous avons pu également mettre en évidence une différence significative dans les passages entre les phases de contrôle et de stresser.

Nous pouvons mettre en évidence que les sujets ont, tout au long de l'expérimentation, mis en place un mécanisme d'apprentissage de la tâche. De plus, on constate que les sujets sont plus concentrés une fois le stresser déclenché.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que les sujets n'ont pour la plupart pas conscience du déclenchement du stresser, montrant certainement un effet de tunnelisation sur la tâche. Nous pouvons émettre également l'hypothèse que le mécanisme de coping se déclenche chez les sujets, accentuant l'état d'alerte chez les sujets et favorisant leurs capacités cognitives, marquant ainsi un état de stress chez les sujets. Ces hypothèses seraient ainsi à vérifier avec des évaluations complémentaires.

### 7.1.5 Résultats - Étude statistique

Dans cette étude statistique, nous avons utilisés deux types de données :

- Les réponses aux questionnaires STAI-6 et NASA-TLX ;
- Les données physiologiques des participants, issues des mesures des capteurs ECG et EDA utilisés.

Dans un premier temps, ces données ont été analysées séparément. Puis, nous

avons cherché à étudier les potentielles corrélations entre les deux types de données.

### Analyse des questionnaires post-expérimentation

Au travers des deux questionnaires proposés à la fin de chaque session de l'expérimentation, le sujet était invité à s'auto-évaluer sur son état de stress et de charge mentale ressentie durant l'expérimentation.

Le premier questionnaire utilisé est le STAI-6 (Spielberger State-Trait Anxiety Inventory 6), permettant de déterminer l'état d'anxiété temporaire des sujets en six questions.

Les réponses aux questions sont qualitatives, et sont par la suite traduites en données quantitatives sur une échelle d'entiers variant de 0 à 3. Les réponses formulées positivement ( $x$ ) sont ramenées à cette échelle en utilisant la valeur opposée ( $3 - x$ ).

Notons que nous avons également dû éliminer un jeu de données, l'un des questionnaires n'ayant pas été complété entièrement.

Par une première pré-visualisation de données, on constate qu'en moyenne le stress perçu par les sujets est bas. L'ensemble du stress perçu durant les quatre passages est similaire.

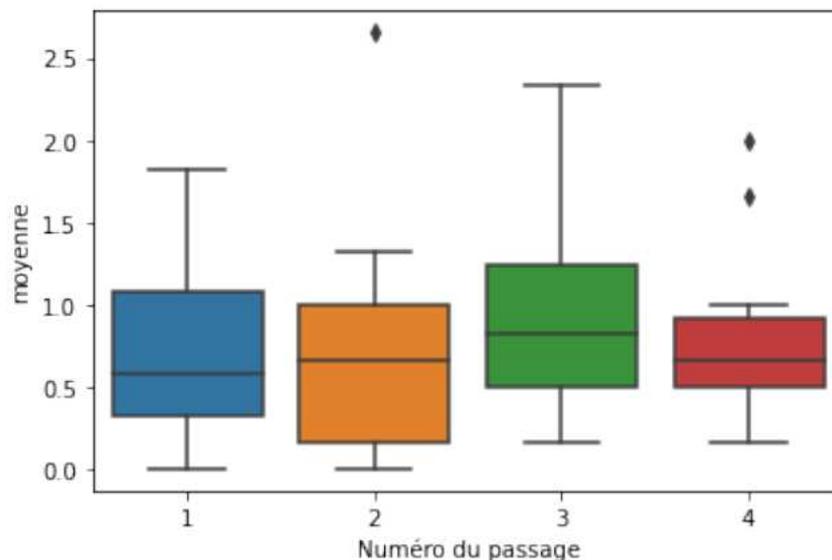


Figure 7.11 – Boxplot du stress perçu chez les sujets en fonction des passages

En utilisant le test de l'ANOVA répétée sur ces données, nous allons pouvoir évaluer si la moyenne des différents passages est la même en analysant leur variance. Pour cela, nous devons donc vérifier que les deux hypothèses de normalité et de sphéricité sont bien respectées, pré-requis nécessaire à l'application de l'ANOVA.

Passage	W	pval	normal
1	0.897806	0.037520	False
4	0.869156	0.013972	False
2	0.867438	0.013065	False
3	0.931525	0.184757	True

Figure 7.12 – Résultat du test de normalité pour chaque passage

Le test de normalité n'étant pas vérifié, les données ne suivent pas une loi normale. Ne pouvant appliquer l'ANOVA, nous avons fait le choix d'utiliser le test non paramétrique répété de Friedman, qui ne nécessite pas d'hypothèse particulière.

	Source	W	ddf1	Q	p-unc
<b>Friedman</b>	Numéro du passage	0.050514	3	2.87931	0.41061

Figure 7.13 – Résultat du test de Friedman sur la comparaison du stress moyen perçu en fonction du passage

Le test de Friedman ne permet pas de détecter de différence de moyenne significative. Nous apportons un complément à cette étude avec le test de Student, afin de vérifier qu'aucune paire de passages n'a de différence significative.

	Contrast	A	B	Paired	Parametric	W-val	alternative	p-unc	p-corr	p-adjust	hedges
<b>0</b>	Numéro du passage	1	2	True	False	62.5	two-sided	0.522431	1.000000	bonf	0.097641
<b>1</b>	Numéro du passage	1	3	True	False	48.0	two-sided	0.184339	1.000000	bonf	-0.246974
<b>2</b>	Numéro du passage	1	4	True	False	77.0	two-sided	0.727351	1.000000	bonf	0.016306
<b>3</b>	Numéro du passage	2	3	True	False	50.0	two-sided	0.126901	0.761409	bonf	-0.326283
<b>4</b>	Numéro du passage	2	4	True	False	44.0	two-sided	0.614821	1.000000	bonf	-0.089118
<b>5</b>	Numéro du passage	3	4	True	False	39.0	two-sided	0.243532	1.000000	bonf	0.283721

Figure 7.14 – Résultat du test de Student avec le STAI-6

Le second questionnaire utilisé est le NASA-TLX (NASA Task Load Index), permettant aux sujets de s'auto-évaluer en six questions sur la charge cognitive perçue lors de l'expérimentation. Les réponses sont directement fournies de manière quantitative, allant de 0 (charge cognitive perçue très faible) à 10 (charge cognitive perçue très forte).

Par une première pré-visualisation des données, on constate qu'en moyenne les sujets perçoivent le quatrième passage comme cognitivement moins intense. On peut ainsi supposer que le stresser utilisé au quatrième passage

a été perçu comme moins stressant en moyenne par les sujets, ou qu'un effet d'apprentissage de la tâche a eu lieu.

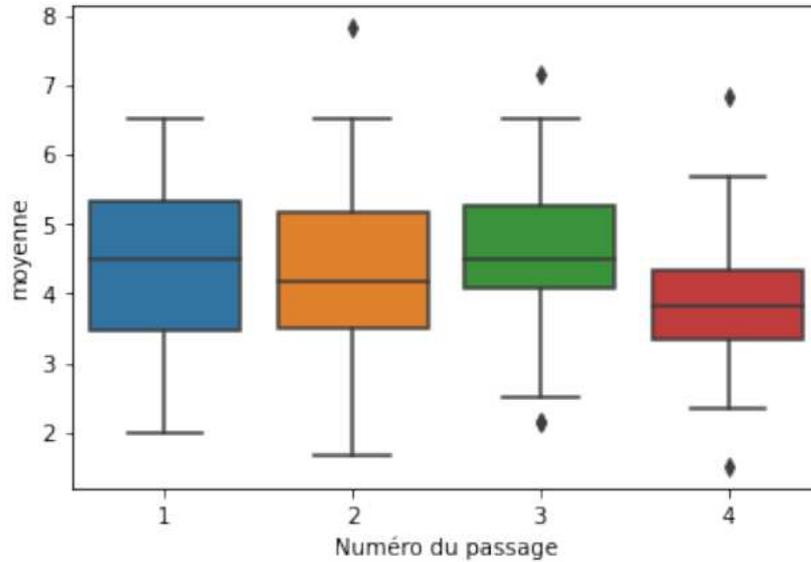


Figure 7.15 – Boxplot de la charge cognitive perçue chez les sujets en fonction des passages

Une fois de plus, nous effectuons le test statistique de l'ANOVA répétée pour déterminer si la moyenne des différents passages est la même en analysant la variance. Contrairement au STAI-6, les deux hypothèses de normalité et de sphéricité sont respectées, nous permettant d'effectuer notre test.

	Source	ddof1	ddof2	F	p-unc	ng2	eps
0	Numéro du passage	3	54	2.596567	0.06174	0.037507	0.91529

Figure 7.16 – Résultat du test de l'ANOVA répétée

Au vu des résultats, on constate qu'on ne peut pas rejeter à plus de 95 % notre hypothèse nulle selon laquelle il n'y a aucune différence significative entre les groupes dépendants. En effectuant également le test de Student, on constate qu'on rejette à 95 % l'hypothèse nulle.

	Contrast	A	B	Paired	Parametric	T	dof	alternative	p-unc	p-corr	p-adjust	BF10	hedges
0	Numéro du passage	1	2	True	True	0.970026	18.0	two-sided	0.344889	1.000000	bonf	0.359	0.179976
1	Numéro du passage	1	3	True	True	0.181430	18.0	two-sided	0.858058	1.000000	bonf	0.241	0.039975
2	Numéro du passage	1	4	True	True	3.100123	18.0	two-sided	0.006178	0.037066	bonf	7.783	0.515797
3	Numéro du passage	2	3	True	True	-0.772797	18.0	two-sided	0.449672	1.000000	bonf	0.31	-0.139414
4	Numéro du passage	2	4	True	True	1.519927	18.0	two-sided	0.145900	0.875401	bonf	0.634	0.283068
5	Numéro du passage	3	4	True	True	2.277376	18.0	two-sided	0.035201	0.211206	bonf	1.866	0.460173

Figure 7.17 – Résultat du test de Student avec le NASA-TLX

### Conclusion de l'analyse

Les résultats de cette analyse ne nous permettent pas de déterminer une évolution des comportements ou de l'état des sujets.

Aucune évolution notable n'ayant eu lieu entre les différents passages, nous pouvons émettre l'hypothèse que la tâche était trop simple et n'engendrait pas de charge cognitive importante, ou que le stresser utilisé était trop peu important.

Nous pouvons aussi nous demander si le stresser n'a pas été perçu par les sujets suite à un effet de tunnelisation sur la tâche.

### Analyse des données physiologiques

L'objectif de cette dernière analyse est de trouver dans les données physiologiques des features [Gedam and Paul, 2021; van Dammen et al., 2022] ayant pu varier au cours des différents passages des sujets.

Comparées aux données issues des questionnaires, les données physiologiques diffèrent de par la présence d'une nouvelle variable nommée la contrainte, qui établit si le sujet était dans une situation de repos (baseline), de contrôle ou de stresser. En d'autres termes, la variable de contrainte permet de déterminer les trois phases clés d'un passage de l'expérimentation.

Il est à noter que durant le pré-traitement des données, plusieurs enregistrements ont été effacés, suite à de probables problèmes de captures.

L'objectif de l'analyse est donc de trouver des features intéressantes, ayant des moyennes qui varient selon la phases de l'expérimentation, entre les passages, ou les deux. Plus précisément, nous avons cherché :

- Les features à la moyenne significativement différente pour chaque passage ;
- Les features à la moyenne significativement différente entre les différentes contraintes pour chaque passage ;
- Les features qui ont subi un phénomène d'adaptation entre les différents passages.

Au vu du nombre important de données et de features, il est impossible d'effectuer une pré-visualisation des données intéressante, le choix de la dimension à réduire étant difficile.

Nous commençons par la recherche de features à la moyenne différente pour chaque passage. Pour pouvoir chercher ces features, il est nécessaire de supprimer la dimension de contrainte. Trois tableaux sont créés, avec pour objectif une valeur unique pour chaque combinaison *passage-feature-sujet*.

Dans le premier tableau, nous opérons à une normalisation des données, en appliquant la formule classique de normalisation afin d'effectuer une analyse indépendante pour le contrôle et pour le stress.

Dans le second, nous ne normalisons pas les données et nous nous contentons de soustraire la baseline au contrôle et au stress, puis nous effectuons une analyse indépendante des deux.

Dans le dernier tableau, nous ne gardons qu'une valeur unique issue du résultat de la formule suivante :  $valeur = (f(stress) - f(baseline)) - (f(contrôle) - f(baseline))$

Pour pouvoir appliquer l'ANOVA répétée, il faut que les features respectent les hypothèses de normalité et de sphéricité. Après test, seule une minorité d'entre elles respectent la contrainte de normalité. Comme précédemment, nous effectuerons alors des tests de Friedman dans un souci d'uniformité entre les features respectant la contrainte de normalité et celles ne la respectant pas.

Pour les données issues de l'ECG, plusieurs features rejettent l'hypothèse nulle à plus de 95 %.

```
{'Controle': {}, 'Stresseur': {'HRV_SD1SD2': 0.04885}}
{'Controle': {'HRV_SD1SD2': 0.03305}, 'Stresseur': {}}
{'Controle': {'HRV_CVSD': 0.04333, 'HRV_MadNN_60': 0.03601}}
```

Figure 7.18 – Liste des features sélectionnées suite au test

En effectuant un test post-hoc Siegel-Friedman, deux features permettent de détecter un écart de moyenne respectivement entre les passages 1 et 3 et les passages 1 et 2, à savoir le HRV MeanNN 30 et le HRV MadNN60.

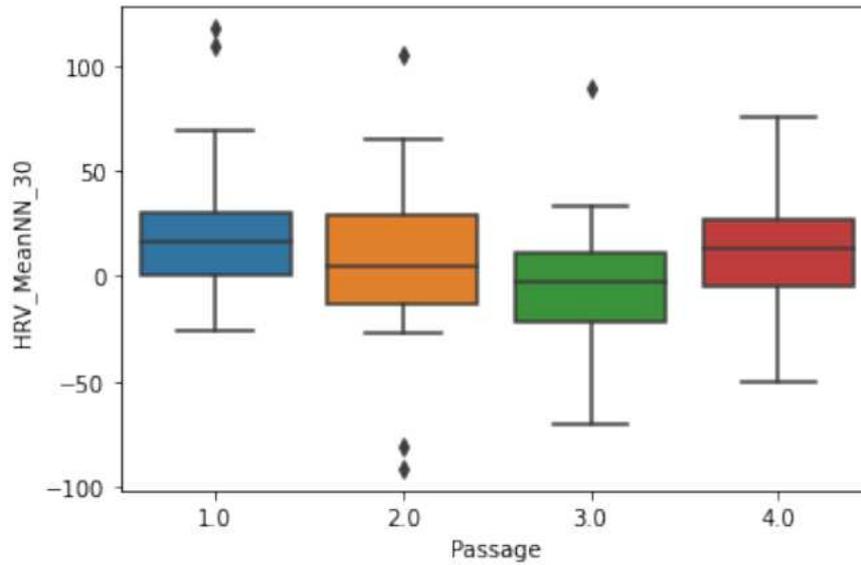


Figure 7.19 – Boxplot de la feature HRV MeanNN 30 en fonction des passages dans la phase de contrôle

Cette différence permet de mettre en avant l’effet d’apprentissage de la tâche sur le temps entre les trois premiers passages.

Pour l’EDA, un grand nombre de features a pu être extrait. De la même manière, les tests post-hoc permettent de détecter un écart significatif entre les passages 1 et 3, et les passages 3 et 4, conformément à nos attentes. Nous illustrons cette détection par la visualisation d’une de ces features en particulier.

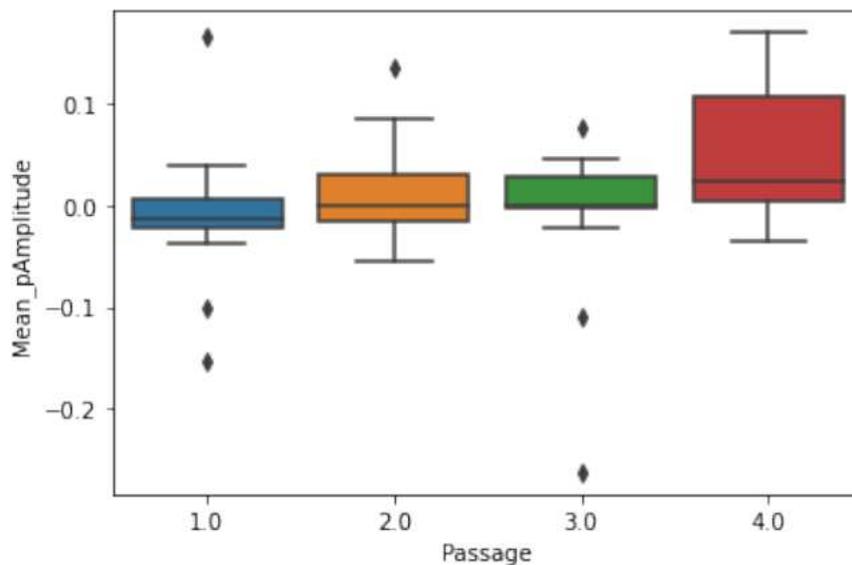


Figure 7.20 – Boxplot de la feature Mean Amplitude en fonction des passages dans la phase de contrôle

La prochaine analyse menée est la recherche de features en fonction des contraintes. Le but est de trouver les features dont la moyenne varie significativement en fonction des contraintes. De la même manière que précédemment, l'ANOVA répétée n'étant pas applicable, nous avons opté pour des tests de Friedman.

A l'issue de ces tests, seule une feature de l'EDA a montré une différence entre les passages.

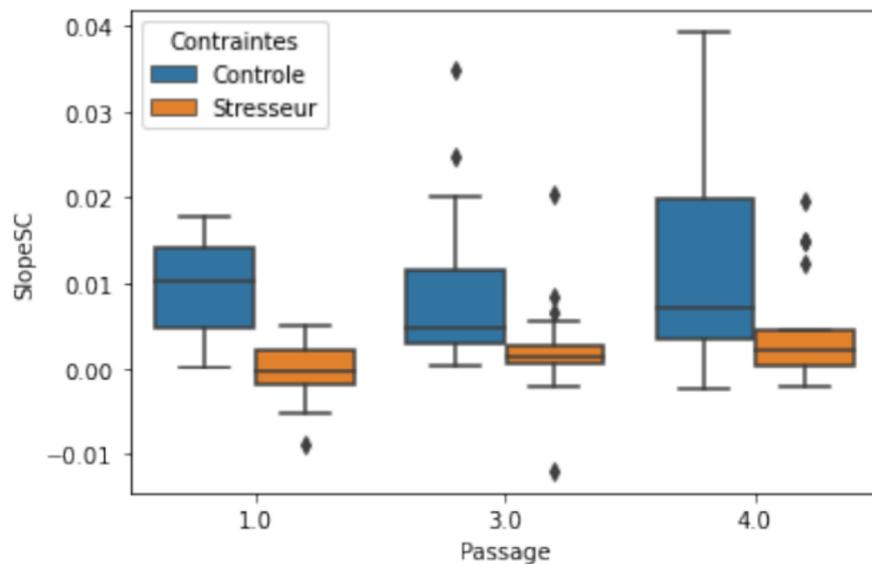


Figure 7.21 – Boxplot de la feature SlopeSC en fonction des passages

D'autres features ont pu être détectées mettant en avant une différence entre les phases de contrôle et de stress, mais ne présentent aucun pattern particulier détectable.

### Conclusion de l'analyse des données physiologiques

Les résultats des tests statistiques permettent de mettre en avant une évolution entre les différents passages.

Nous pouvons faire l'hypothèse d'un apprentissage de la tâche entre les passages, ainsi qu'une adaptation au stresseur présent entre les trois premiers passages.

## 7.1.6 Résultats - Discussions

Nous pouvons croiser les résultats des différentes analyses que nous avons effectuées.

Tout d'abord, nous avons réalisé une corrélation entre les scores obtenus aux questionnaires NASA-TLX et STAI-6 et les résultats de l'analyse des données physiologiques.

Nous avons observé des corrélations très faibles, inférieures à 50 %, entre la charge mentale, le stress et les features détectées lors de l'analyse. Cependant, nous avons identifié une corrélation significative entre la charge mentale et le stress.

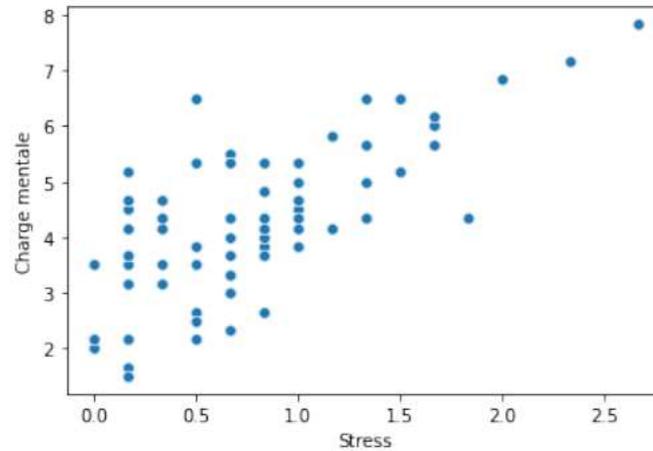


Figure 7.22 – Corrélation entre la charge mentale et le stress

Nous n'avons pas pu établir de corrélation entre les données provenant de l'environnement et les données physiologiques.

L'objectif de cette expérimentation était de déterminer si notre profil est capable de produire de bonnes prédictions sur l'état de maîtrise de la situation lors du passage 4, en se basant sur les résultats des passages 1 à 3 et en comparant son analyse avec les résultats réels lors de ce dernier passage.

En convertissant les données physiologiques et les données calculées en masses de croyances, et en les intégrant à notre profil, nous avons obtenu un taux de réussite de 100 % : pour chaque sujet, le profil a correctement identifié l'état de la situation lors du passage 4. Nos hypothèses H1 et H2 sont validées.

Cependant, d'après les résultats de l'analyse statistique des différentes données, nous ne sommes pas en mesure de valider correctement notre hypothèse H3. En effet, les données physiologiques ne présentent pas suffisamment de variations significatives entre les différents passages pour pouvoir conclure à une réelle évolution de l'état de stress chez les sujets. En d'autres termes, les masses de croyances fusionnées entre les passages 1 à 3 étaient trop similaires chez la majorité des sujets, ce qui nous a empêché d'analyser toutes les variations possibles de l'état de la situation dans notre profil. Ainsi, nous ne pouvons pas prouver le bon fonctionnement du système dans tous les cas que nous aurions souhaité tester.

Nous pouvons donc supposer que la tâche était trop simple et/ou que le stimulus stressant n'était pas suffisamment intense pour tous les sujets ayant participé à cette expérimentation. Ce phénomène est perceptible dans

d'autres expérimentations menées par d'autres pairs [Binsch et al., 2021], dont les résultats tendent à prouver qu'il est complexe de générer du stress en environnement virtuel.

Cependant, nous avons pu tirer des conclusions positives de l'étude des données de l'environnement virtuel en détectant une évolution significative entre les passages, ce qui peut indiquer la mise en place de capacités d'apprentissage chez les sujets. Nous avons également réussi à détecter des différences significatives entre les passages lors des phases de contrôle et de stress. Nous pouvons donc formuler l'hypothèse que nous avons réussi à détecter des preuves de l'apparition de stress chez les sujets.

### Test du profil - Résumé

Au travers d'une expérimentation en crossover regroupant une vingtaine de sujets, nous avons tenté de valider la capacité de notre profil à prédire correctement l'état d'une classe de situations.

Au travers de cette expérimentation, nous avons pu créer un profil de stress utilisant une classe de situation particulière et identique chez tous les sujets durant trois passages en environnement virtuel, reflétant leur capacité à gérer le stress pour la tâche spécifique confiée. À l'issue de ces trois passages, le profil a pu construire une prédiction sur une seconde classe de situations pour chaque participant selon leur profil.

À la fin de l'expérimentation, le profil a réussi à prédire correctement l'ensemble des états de stress de l'ensemble des sujets au cours du quatrième passage

Cependant, le manque de variation significative dans les données physiologiques et la trop grande réussite à la tâche dans tous les passages nous laissent à penser qu'une évaluation plus poussée du profil est nécessaire afin de vérifier ses bonnes prédictions.

## 7.2 Scénarisation

Dans le cadre de notre travail de conception du moteur de scénarisation, nous avons réalisé une expérimentation afin de tester la compréhension des scénarios générés grâce à notre approche. Dans cette section, nous détaillerons les caractéristiques de cette expérimentation en réalité virtuelle. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus.

### 7.2.1 Hypothèses

L'objectif de l'expérimentation sur le moteur de scénarisation est de déterminer sa capacité à proposer des scénarios d'entraînements personnalisés utilisant le principe des contes du Gange. Plus précisément, nous cherchons à montrer que l'utilisation des contes du Gange permet une construction du scénario présentant une cohésion narrative importante et une montée en tension narrative croissante. Nous cherchons également à prouver que l'utilisation de cette structure narrative permet de créer un entraînement à la gestion du stress présentant une difficulté croissante et perceptible par l'apprenant, tout en lui permettant de s'entraîner à percevoir son environnement.

Ainsi, les différentes hypothèses que nous cherchons à démontrer dans cette expérimentation reflètent les questions relatives au fonctionnement de notre moteur :

- H1 : L'utilisation des contes du Gange dans la construction d'un scénario permet la mise en place d'une montée de la tension narrative croissante ;
- H2 : L'utilisation du fusil de Tchekov et du foreshadowing permet de créer des situations permettant de travailler la *situation awareness* au sein du scénario dans l'enchaînement des situations ;

Nous souhaitons ainsi vérifier que l'utilisation de contes du Gange pour créer le scénario permet une meilleure immersion et une meilleure compréhension de celui-ci. Nous cherchons à évaluer si les participants s'impliquent davantage dans l'environnement virtuel et comprennent mieux les situations proposées.

### 7.2.2 Protocole

Dans cette étude, les sujets sont répartis en deux groupes distincts en fonction du type de scénario auquel ils seront exposés. Cette scission vise à comparer les effets de notre approche sur l'expérience des participants lors de l'expérimentation.

Le premier groupe participe à l'expérimentation au travers un scénario généré en utilisant l'ensemble des règles de génération établies dans nos tra-

vaux. Le scénario est conçu de manière cohérente et structurée en utilisant des éléments narratifs spécifiques, offrant ainsi une expérience narrative immersive aux participants.

Le deuxième groupe, quant à lui, participe à l'expérimentation dans des conditions différentes, car il fait face à une absence de scénario contrôlé et supervisé. Cela signifie que les participants de ce groupe sont confrontés à un environnement virtuel sans aucune structure narrative ou direction spécifique, créant ainsi une expérience dépourvue de narration issue de notre contrôle.

Cependant, les tâches confiées aux deux groupes restent les mêmes, ce que nous détaillerons dans la suite du protocole.

En séparant les participants en deux groupes avec des approches scénaristiques différentes, nous cherchons à évaluer les effets de la présence ou de l'absence de scénario sur l'immersion, la compréhension et l'expérience globale des utilisateurs.

## **Population**

Pour cette expérimentation, notre principal objectif était d'obtenir un maximum de résultats afin de pouvoir tirer des conclusions significatives. Nous souhaitons recueillir un volume de données suffisamment important pour améliorer la fiabilité statistique et la validité des conclusions tirées de l'étude.

Cependant, le contexte de l'expérimentation qui nous a été autorisé ne nous permettait pas de fixer un nombre défini de passations. Certaines contraintes liées aux ressources disponibles, au temps imparti ou à d'autres facteurs logistiques ont rendu difficile la détermination d'un échantillon expérimental avec un nombre précis de passations. D'après le logiciel GPower, le nombre minimum de participants aurait dû être de 210 afin de remplir les conditions des tests statistiques.

Par conséquent, nous avons opté pour une approche plus souple en ce qui concerne le nombre de passations. Nous avons cherché à inclure autant de participants que possible tout en respectant les conditions et les limites fixées par le contexte de l'expérimentation. Cette approche nous a permis de maximiser la taille de l'échantillon sans compromettre la qualité des données collectées.

Les critères d'exclusion sont les suivants :

- Personnes atteintes de cinétose ;
- Personnes atteintes d'épilepsie.

La population de sujets participant à notre étude était constituée de médecins, d'auxiliaires sanitaires et d'infirmiers militaires en formation au sein des

locaux de l'Hôpital d'instruction des armées du Val-de-Grâce. Cette collaboration était hautement pertinente pour notre recherche, car notre cas d'application, VICTEAMS, était spécifiquement destiné à ce public cible. Nous avons pu obtenir un total de neuf participations à l'expérimentation.

### **Tâche**

L'expérimentation se déroule dans un environnement virtuel représentant un avant-poste médical, et consiste en une série de tâches à accomplir. Pendant ces tâches, des stressseurs audiovisuels sont utilisés pour perturber le sujet. Les tâches confiées incluent le tri de patients à l'arrivée d'une ambulance, la gestion des places dans la tente et la gestion d'une demande d'une évacuation médicale aérienne (ou medevac). Les stressseurs utilisés comprennent des stimuli sonores tels que des cris de blessés, des explosions, des acouphènes, des bruits d'orages, des pleurs, et des brimades d'un supérieur, ainsi que des stimuli visuels tels que l'absence de source de lumière.

Pour les deux groupes, les sujets suivent une liste de tâches dans un ordre précis. Ils doivent trier des blessés arrivant par ambulance selon la gravité de leurs blessures. Puis, ils doivent gérer une demande de medevac afin de libérer de la place dans la tente.

### **Matériel**

Pour cette seconde expérimentation, le matériel utilisé était similaire à celui de la première, à l'exception des capteurs physiologiques. Contrairement à la première expérience qui incluait la collecte de données physiologiques, la présente étude s'est concentrée exclusivement sur le système de scénarisation sans recourir à la surveillance des réponses physiologiques des participants.

En éliminant l'utilisation des capteurs physiologiques, nous avons souhaité cibler spécifiquement l'impact du système de scénarisation sur les participants, en nous focalisant sur leurs réponses comportementales. Cette approche nous a permis d'approfondir notre compréhension de l'effet du système de scénarisation lui-même, indépendamment des réactions physiologiques qui pourraient être associées.

### **Procédure**

La procédure de notre étude consiste en un unique passage en réalité virtuelle pour chaque participant. Avant cette expérience, les sujets remplissent un pré-questionnaire visant à collecter des informations sur leur profil et leur état initial concernant le sujet de l'étude. Après leur immersion en réalité virtuelle, les participants complètent un questionnaire post-passage pour évaluer leur perception et leur expérience.

La mobilisation de chaque sujet s'étend sur une durée totale de vingt minutes, englobant le temps dédié au remplissage du pré-questionnaire, à l'expérience en réalité virtuelle proprement dite et à la réponse au questionnaire post-passage.

### **7.2.3 Résultats - Formulaire de pré-expérimentation**

Comme dans la première expérience, les formulaires de pré-expérimentations nous permettent de détecter les facteurs perturbateurs potentiels au sein des profils individuels qui pourraient biaiser les résultats de notre étude. En analysant ces informations avant le début de l'expérience, nous sommes en mesure de prendre des mesures préventives pour écarter ou contrôler ces éléments perturbateurs de manière appropriée.

#### **Questionnaire *STAI-Y - Inventaire d'anxiété Trait***

Comme pour la première expérimentation, nous utilisons le questionnaire STAI-Y Trait pour mesurer l'anxiété des sujets. Nous avons sélectionné ce questionnaire pour sa structure en seulement vingt questions, ainsi que son utilisation dans bon nombre d'études du stress, ce qui en fait un questionnaire de choix. Le questionnaire effectue l'inventaire de l'état d'anxiété général du sujet [Spielberger, 1970]. Pour les mêmes raisons que la première expérimentation, nous n'utilisons pas le questionnaire STAI-Y État, destiné à détecter l'anxiété étatique chez le sujet et qui ne nous permet pas d'écarter les sujets pouvant altérer les résultats du fait d'une anxiété générale trop importante.

#### **Questionnaire *Freiburg Mindfulness Inventory short***

Le Freiburg Mindfulness Inventory short a été utilisé pour évaluer le niveau de pleine conscience chez les individus, notamment en mesurant la présence attentive, l'acceptation et l'engagement dans l'instant présent.

Suite à l'analyse des résultats des deux pré-questionnaires, nous avons déterminé qu'aucun sujet de l'expérimentation ne devait être exclu de l'étude. Aucun cas présentant des caractéristiques ou des réponses aberrantes susceptibles de biaiser les résultats de l'analyse post-expérimentation n'a été identifié.

### **7.2.4 Analyse post-expérimentation**

#### **NASA-TLX**

Tout comme la première expérimentation, le NASA-TLX est utilisé dans cette étude pour permettre aux participants de s'auto-évaluer en répondant à

six questions sur la charge cognitive perçue lors de l'expérimentation.

La seule différence significative entre les groupes réside dans la question relative à l'évaluation du niveau de frustration. Le groupe qui a eu accès au scénario a manifesté une frustration significativement moindre par rapport au groupe qui n'a pas eu de scénario contrôlé et supervisé.

Ces résultats nous conduisent à émettre l'hypothèse que la conception et la mise en place du scénario ont permis aux participants de mieux appréhender la tâche, ce qui a probablement contribué à réduire leur niveau de frustration pendant l'expérimentation.

### **Scénario**

Nous avons développé un questionnaire personnalisé visant à recueillir les impressions des participants concernant le scénario, leur niveau de compréhension ainsi que leur perception de l'influence sur le déroulement de l'histoire comportant un total de treize questions. Les participants sont invités à fournir leurs réponses en utilisant une échelle numérique allant de 1 à 10. Du fait du faible échantillon, nous avons simplement comparés les moyennes des réponses des deux groupes à chaque question.

A l'instar du NASA-TLX, nous n'avons pas pu observer de différence significative entre les deux groupes sur la plupart des questions. Cependant, deux questions se sont avérées significativement différentes, dont celle portant sur la compréhension du scénario. Le groupe ayant eu accès à un scénario semble avoir démontré une meilleure compréhension (7 en moyenne) que le groupe qui n'en avait pas eu (4,6 en moyenne).

L'analyse de ce résultat semble donc indiquer que notre hypothèse est partiellement validée. En effet, l'utilisation des contes du Gange semble favoriser une meilleure compréhension globale du scénario, comme le suggère la différence significative observée dans la question liée à la compréhension du scénario.

Cependant, il est intéressant de noter que les deux groupes ne présentent pas de différence significative concernant la plupart des autres questions, et notamment la facilité de compréhension due aux dialogues (3,75 pour le groupe scénario contre 3,4 pour le second), malgré le fait que le groupe sans scénario supervisé n'ait pas été exposé à des dialogues dans l'histoire. Toutefois, les participants de ce groupe ont affirmé que les sons ambiants ne leur ont pas permis de mieux comprendre le scénario contrairement au groupe ayant eu accès au scénario supervisé (6,25 en moyenne pour ce groupe contre 4,2 pour le second).

Par ailleurs, les résultats du questionnaire indiquent que les sujets des deux groupes n'ont pas manifesté de perception quant à la progression croissante de la complexité des tâches et de la situation (2 et 2,6 en moyenne). Cette constatation permet de formuler l'hypothèse que les participants ont pu faire l'expérience d'un effet de tunnelisation lors de l'exécution de la tâche,

limitant ainsi leur capacité à appréhender globalement l'environnement dans son ensemble.

### **Analyse qualitative**

En complément de l'analyse des questionnaires, nous avons procédé à une analyse des données qualitatives provenant de l'environnement virtuel, notamment le temps de réaction et le nombre d'erreurs commises par les participants. Toutefois, ces mesures n'ont pas révélé de différences significatives entre les deux groupes. Il est important de noter que l'objectif principal de cette étude n'était pas de comparer les performances entre les groupes, car la tâche proposée aux participants était volontairement simple. Par conséquent, le résultat de l'analyse était en adéquation avec les attentes établies pour cette étude.

### **7.2.5 Résultats - Discussions**

Tout d'abord, les questionnaires révèlent deux différences significatives entre les deux groupes : les participants ayant été exposés au scénario ont exprimé une meilleure compréhension du scénario, et cette compréhension semble être soutenue par la présence d'une ambiance sonore, pourtant commune aux deux groupes.

Malgré l'utilisation de deux approches scénaristiques différentes, aucune distinction notable n'a été mise en évidence dans les réponses des participants. Cette absence de différence peut être déconcertante, car on aurait pu s'attendre à ce que le groupe avec un scénario plus structuré manifeste une meilleure immersion et une compréhension plus profonde des tâches proposées par rapport au groupe sans scénario.

Plus particulièrement, notre étude tend à montrer que, malgré le fait que le deuxième groupe n'ait pas eu de scénario contrôlé, les participants ont eu une impression de supervision. Cette observation soulève des questions intéressantes sur la perception subjective de l'environnement virtuel et la capacité des individus à créer des narrations implicites même en l'absence de scénario explicite. Ces résultats suggèrent que les participants ont pu projeter leurs propres significations et interprétations sur les situations virtuelles, ce qui a pu influencer leur expérience et leur compréhension globale de l'expérimentation [Bevensee et al., 2012; Kleinman et al., 2020; Revi et al., 2020]. Cette constatation met en évidence la complexité de la compréhension en réalité virtuelle et ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des processus cognitifs et émotionnels impliqués dans l'interprétation des environnements virtuels sans scénario explicite.

Ces résultats soulèvent de nouvelles questions quant à l'efficacité de l'utilisation des contes du Gange dans la création de scénarios en réalité vir-

tuelle et appellent à une réévaluation des approches narratives pour améliorer l'expérience des utilisateurs.

Il est à noter que les conditions d'expérimentation pour cette étude n'étaient pas optimales, car le sujet n'était pas isolé et l'ensemble des participants étaient présents simultanément dans la même salle. Cette situation a été imposée par les personnes nous ayant autorisé à réaliser l'expérimentation dans les locaux de l'Hôpital d'instruction des armées du Val-de-Grâce. La présence de plusieurs participants dans le même environnement peut avoir entraîné des distractions et des interactions non contrôlées entre les sujets, ce qui pourrait avoir influencé les résultats et introduit des biais potentiels dans l'étude. Il est important de noter que malgré ces contraintes, nous avons pris des mesures pour minimiser l'impact de ces facteurs sur les données collectées, tout en reconnaissant que des conditions plus idéales auraient pu offrir des résultats plus robustes.

La brièveté du passage en environnement virtuel pour les participants pourrait expliquer en partie les résultats obtenus dans l'expérience. La durée limitée de l'expérience en réalité virtuelle peut avoir entravé la possibilité pour les participants de s'immerger pleinement dans le scénario, de développer une compréhension approfondie du scénario proposé, et de détecter l'ensemble des éléments d'annonces mis en place. Ce manque d'engagement émotionnel et cognitif pourrait être responsable du résultat observé. Une prolongation de la durée de l'expérience en réalité virtuelle aurait probablement permis aux participants de mieux s'acclimater à l'environnement et d'appréhender plus efficacement les subtilités du scénario, conduisant ainsi à une expérience plus satisfaisante et à un degré de focus plus important. Cette observation souligne l'importance de prendre en considération la durée de l'expérience en réalité virtuelle dans la conception et l'interprétation des résultats d'études similaires à l'avenir.

### **Test du moteur de scénarisation - Résumé**

Afin de vérifier nos hypothèses sur le moteur de scénarisation, nous avons mené une expérimentation dans le cadre de VICTEAMS auprès d'un public composé de médecins militaires en formation.

L'expérimentation a consisté en une étude comparative entre deux groupes de sujets, chaque groupe passant sur un scénario différent : un sur un scénario conçu avec notre moteur de scénarisation et un sur un scénario sans utilisation de théories narratives.

Les résultats de cette expérimentation indiquent qu'il existe une différence significative entre les groupes en ce qui concerne la compréhension du scénario. Le groupe qui a été exposé au scénario conçu avec notre moteur semble avoir une meilleure compréhension de l'histoire par rapport au groupe qui n'y a pas été exposé.

Cependant, malgré cette différence dans la compréhension du scénario, les deux groupes ont exprimé une impression similaire sur le reste des éléments de la scène. Cela suggère que l'expérience globale de contrôle et d'influence sur le déroulement de l'histoire était similaire pour les deux groupes, même si leur niveau de compréhension du scénario variait. En outre, aucun des deux groupes n'a démontré une perception de la montée en difficulté des tâches, soulevant ainsi des interrogations concernant la reconnaissance des différentes phases des contes du Gange par le groupe qui a eu accès au scénario.

**Quatrième partie**

**Conclusion et Perspectives**

Au cours de ce mémoire, nous avons présenté tous les concepts clés liés à notre problématique, qui concerne la création d'un profil dynamique pour le suivi de la compétence de gestion du stress en situation de crise, ainsi que la problématique de la création d'un entraînement virtuel pour développer cette compétence.

De plus, nous avons exposé notre conception de ce profil et de ce moteur, ainsi que leur mise en place et leur validation.

Dans cette partie, nous examinerons résumerons l'ensemble de notre contribution. A partir de cet inventaire, nous présenterons à nouveau tous les avantages et inconvénients de notre conception et de notre implémentation. Nous aborderons plus spécifiquement ces aspects pour le profil dynamique et le moteur de scénarisation. Nous discuterons également des perspectives de recherche futures pour ces deux modalités, ainsi que de l'ensemble des fonctionnalités que nous aurions souhaité pouvoir ajouter au cours de cette thèse. Nous traiterons finalement de plusieurs questions éthiques autour de nos travaux.

---

<b>8 Conclusion</b>	<b>151</b>
<b>9 Discussions et Perspectives</b>	<b>153</b>
9.1 Perspectives . . . . .	153
9.1.1 Perspectives du profil . . . . .	153
9.1.2 Gestion des croyances . . . . .	156
9.1.3 Comparaison et validation . . . . .	160
9.1.4 Perspective de la scénarisation . . . . .	162
<b>10 Éthique</b>	<b>164</b>
10.0.1 Individu et stress . . . . .	164
10.0.2 Individu et utilisation d'un entraînement en réalité virtuelle	166
10.0.3 Gestion des données des individus . . . . .	168

---

# Chapitre 8

## Conclusion

La présente thèse a exploré et développé une approche d'entraînement en réalité virtuelle visant à permettre aux individus de s'entraîner à la mise en place de technique de gestion de leur stress dans le cadre des situations de crise. En nous appuyant sur des techniques de modélisation des connaissances, d'utilisation de données issues de plusieurs modalités et du modèle mathématique des croyances transférables, nous avons conçu une approche permettant la création et l'exploitation d'un profil personnalisé qui cartographie les éléments jugés stressant pour l'apprenant. Nous avons également conçu le fonctionnement de ce profil de manière automatique et son utilisation dans la création de scénarios en environnement virtuel.

Notre première démarche a été de définir le stress et d'identifier les moyens de l'exploiter dans le cadre de sa gestion sous forme de profil individuel. Nous avons approfondi notre compréhension des mécanismes du stress, en nous appuyant sur des études scientifiques et des recherches approfondies dans le domaine. Grâce à une analyse des données physiologiques, comportementales et des réponses émotionnelles, nous avons pu établir des profils de gestion du stress personnalisés, offrant ainsi une approche adaptée à chaque individu. Nous nous sommes également concentrés sur le développement de structures narratives conçues pour favoriser l'entraînement aux situations de crise de manière efficace. Nous avons cherché à optimiser l'expérience d'entraînement en utilisant des techniques de scénarisation.

Par la suite, nous avons présenté en détail l'ensemble de la conception du profil de gestion du stress et du modèle de scénarisation, en adoptant une approche à la fois conceptuelle et technique. Dans un premier temps, nous avons exposé les fondements conceptuels de notre approche, en expliquant les principes sous-jacents à la création des profils de gestion du stress. Nous avons mis en évidence l'importance d'intégrer des données physiologiques et comportementales pour établir des profils personnalisés. Nous avons également souligné les avantages de l'utilisation du modèle mathématique des croyances transférables pour la représentation des connaissances selon différents niveaux de granularité. De cette conception découle notre proposition d'une nouvelle méthode de représentation des compétences de l'apprenant,

prenant en compte cette granularité grâce au modèle mathématique adopté.

Ensuite, nous avons présenté le modèle de scénarisation, en soulignant sa structure narrative et sa capacité à intégrer les profils de gestion du stress. Nous avons montré l'intérêt de l'utilisation la structure narrative des Contes du Gange pour la représentation de scénarios d'entraînement de situations de crise dont la représentation ne pouvait se faire grâce aux techniques classiques de scénarisation. Nous avons mis en évidence les éléments scénaristiques clés nécessaires à la création de ces scénarios tout en proposant une méthode permettant de les créer. Nous avons également proposé une méthode permettant d'intégrer les théories narratives du foreshadowing et du fusil de Tchekov dans ces scénarios dans le but d'entraîner l'apprenant à plusieurs compétences non-techniques liées à la prise de conscience de l'environnement.

Nous avons également développé un algorithme de modification du scénario, permettant d'ajuster l'environnement virtuel en fonction des réactions physiologique de l'apprenant, mais également en fonction de la difficulté qu'il rencontre lors de l'exécution des tâches qui lui sont demandées. Ces algorithmes ont été conçus pour détecter les niveaux de stress et les comportements spécifiques de l'apprenant afin de réduire l'intensité des stimuli stressants pour éviter une surcharge émotionnelle, tout en maintenant un niveau de défi approprié pour maintenir l'engagement et l'intérêt de l'apprenant.

En intégrant les aspects conceptuels et techniques de notre approche, nous avons élaboré un cadre complet pour l'entraînement en réalité virtuelle à la gestion du stress, lequel a été soumis à deux phases d'expérimentation afin de valider notre profil de gestion du stress. Malgré des variations significatives que nous jugeons trop peu différentes dans les différentes données que nous avons collectées, nous avons réussi à démontrer la capacité de notre profil à représenter et à prédire correctement l'état des compétences d'un apprenant à gérer son stress dans certaines situations particulières. Nous avons également mis en évidence l'existence d'une différenciation de compréhension d'une même scène d'un entraînement selon l'exposition à un scénario explicite et contrôlé ou à un scénario implicite et non contrôlé. Nous avons également mis en évidence plusieurs phénomènes liés à la concentration du sujet sur sa tâche et au changement de perception de son environnement.

# Chapitre 9

## Discussions et Perspectives

Dans ce chapitre, nous aborderons les perspectives et les améliorations envisagées pour notre profil. Nous discuterons également des limites inhérentes à notre approche.

### 9.1 Perspectives

Cette section explore les perspectives d'amélioration de notre approche d'entraînement aux situations de crise stressante grâce à la réalité virtuelle, en mettant l'accent sur la création de profils de stress personnalisés. Nous examinerons les mécanismes sous-jacents à la personnalisation des entraînements en fonction du niveau de stress individuel, ainsi que les technologies impliquées dans cette adaptation dynamique. Cette analyse nous permettra d'envisager les avancées technologiques qui pourraient optimiser l'expérience d'entraînement.

#### 9.1.1 Perspectives du profil

##### **Amélioration du modèle sémantique**

Une première piste d'amélioration de notre approche d'entraînement en réalité virtuelle se situe au niveau de la représentation des connaissances. Actuellement, nous utilisons une taxonomie simple pour organiser les informations permettant de générer les profils ainsi que les éléments instanciables dans les scénarios dans l'environnement virtuel. Cependant, nous pouvons envisager une représentation sémantique plus avancée.

En adoptant un modèle sémantique plus riche et expressif, nous pourrions mieux saisir les relations de sens entre les concepts et les situations, ce qui permettrait une meilleure contextualisation des apprentissages. Une représentation sémantique plus riche favoriserait ainsi une plus grande personnalisation des entraînements en fonction du profil de stress de chaque

apprenant grâce à la possibilité de créer des situations plus précises, améliorant ainsi l'efficacité globale de notre approche d'entraînement au stress en réalité virtuelle par le biais de raisonnement plus profonds et plus variables Zagal et al. [2005].

### **Extraction d'un modèle universel**

En outre, une autre amélioration potentielle de notre approche réside dans la conception d'une partie de la taxonomie qui serait universelle, permettant ainsi une meilleure exportabilité de notre modèle de représentation des éléments instanciables en environnement virtuel. En intégrant une partie de la taxonomie qui serait largement reconnue et utilisée au sein de la communauté de la réalité virtuelle, nous faciliterions l'interopérabilité et la réutilisation de notre approche dans d'autres contextes ou applications. Cela permettrait également de créer une base commune de représentation des connaissances, favorisant ainsi la collaboration et le partage des connaissances entre les chercheurs et les développeurs travaillant dans le domaine de la réalité virtuelle. Bien que cette idée ait déjà été explorée par d'autres chercheurs [Nasiri Khoozani, 2011; Zagal et al., 2005; Venant et al., 2015], elle demeure une piste d'amélioration intéressante à considérer dans notre objectif d'optimisation de l'efficacité et de l'adaptabilité de notre approche d'entraînement au stress en réalité virtuelle.

### **Ajout de pré-requis**

Notre approche a été conçue de manière à être accessible à un large éventail de participants, sans imposer de compétences ou de connaissances préalables spécifiques en matière de gestion du stress. L'absence de pré-requis dans l'entraînement aux situations de crise est un choix délibéré du fait de l'absence de tels pré-requis dans ce domaine.

Cependant, l'intégration de la possibilité de traiter des pré-requis concernant les compétences dans notre approche pourrait faciliter sa réutilisation dans d'autres contextes [Rahmouni et al., 2021a].

Nous pourrions ainsi offrir des expériences d'apprentissage plus adaptées et pertinentes, tout en conservant la flexibilité et l'accessibilité qui caractérisent notre approche actuelle. Cela permettrait d'élargir les perspectives d'utilisation de notre entraînement en réalité virtuelle dans divers domaines liés à la gestion du stress. Cependant, l'ajout de pré-requis à la représentation du profil entraînerait des modifications dans les différents calculs du profil, ainsi qu'un travail plus précis de représentation de la taxonomie [Rahmouni et al., 2021b].

### **Intégration du formateur**

Un aspect essentiel à prendre en compte dans la conception de la taxonomie est le rôle du formateur. Dans notre approche actuelle, nous avons fait le choix de fournir au formateur un outil permettant de gérer lui-même la taxonomie, lui offrant ainsi une plus grande liberté et flexibilité dans l'organisation des informations et des scénarios pour les séances d'entraînement en réalité virtuelle. Ce choix vise à permettre au formateur de personnaliser l'expérience d'entraînement en fonction des besoins spécifiques de ses apprenants, adaptant ainsi la taxonomie aux caractéristiques de son public cible.

Cependant, une approche alternative intéressante serait d'intégrer directement le rôle du formateur dans la conception de la taxonomie, notamment dans le cadre de la représentation universelle évoquée précédemment. En impliquant activement le formateur dès la conception, nous pourrions bénéficier de son expertise pédagogique et de son expérience pratique dans la gestion de l'entraînement. Cela permettrait d'élaborer une taxonomie plus précise et plus adaptée aux besoins des formateurs et des apprenants, favorisant ainsi une meilleure intégration de la réalité virtuelle dans les méthodes d'enseignement et d'entraînement.

Intégrer le formateur dans la conception de la taxonomie pourrait également renforcer l'aspect collaboratif de notre approche, en favorisant les échanges et les retours d'expérience entre les professionnels de la formation et les concepteurs de l'entraînement en réalité virtuelle. Cette collaboration étroite permettrait ainsi de tirer parti de l'expertise combinée de ces deux acteurs pour créer une approche d'entraînement encore plus cohérente, efficace et adaptée aux besoins spécifiques des apprenants, ou encore de développer une base de connaissance qu'il serait possible de personnaliser en fonction des besoins en scénarisation.

### **Modèle ontologique de représentation des connaissances**

En complément des perspectives d'améliorations évoquées précédemment, une autre voie que nous pourrions explorer est le développement d'une ontologie respectant le schéma classique de la structuration d'une ontologie de représentation des compétences.

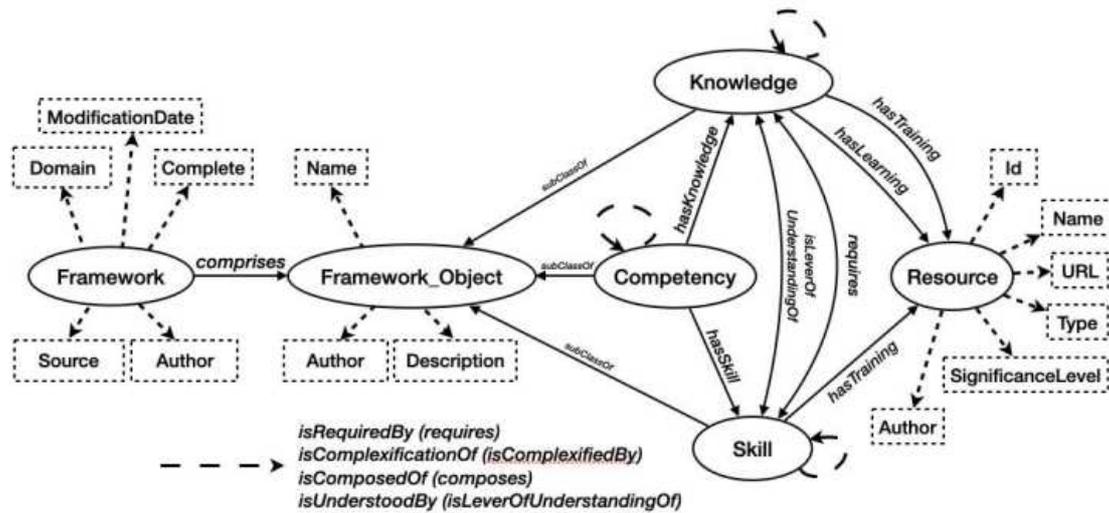


Figure 9.1 – Modélisation des compétences sous forme d'ontologie [Mailles, 2020]

Actuellement, notre approche repose sur une taxonomie simplifiée pour organiser l'ensemble des connaissances. Cependant, en développant une ontologie spécifique à la représentation des compétences en gestion du stress, nous pourrions apporter une plus grande cohérence et une meilleure compréhension des relations entre les différentes compétences et niveaux de maîtrise.

Une ontologie bien conçue permettrait de formaliser et de modéliser de manière plus explicite les compétences requises pour gérer efficacement le stress. En décrivant les relations hiérarchiques, les dépendances et les interactions entre les différentes compétences, cette ontologie favoriserait une vision encore plus holistique et structurée de l'entraînement aux situations de crise.

Par ailleurs, une ontologie des compétences pourrait être un outil puissant pour assurer l'interopérabilité et la réutilisabilité de notre approche dans d'autres contextes et domaines. En suivant des normes et des pratiques établies pour la modélisation des compétences, nous pourrions établir une base commune de connaissances qui faciliterait l'échange d'informations et de bonnes pratiques entre les différentes initiatives de formation ou d'entraînement en réalité virtuelle.

### 9.1.2 Gestion des croyances

#### Interprétation des données issues des capteurs

Nous avons utilisés plusieurs capteurs afin de récupérer des données analysables afin de statuer de la présence ou non de stress chez l'individu.

Cependant, l'évaluation précise et distincte des manifestations du stress s'avère être complexe du fait qu'il est difficile de distinguer le stress d'autres états de l'individu par le seul moyen des données de nos capteurs. Cette similitude des réponses physiologiques entre différents états de l'individu limite la clarté des distinctions au sein de nos données.

Les réactions engendrées par le stress et la charge cognitive peuvent présenter des chevauchements significatifs, rendant difficile leur séparation sur la base de nos mesures actuelles.

La cinétose ou mal du simulateur est un trouble causé par une incohérence sensorielle entre les informations visuelles perçues par l'utilisateur et les sensations corporelles réelles. Les mouvements visuels perçus par les yeux ne correspondant pas aux signaux vestibulaires et aux informations proprioceptives peuvent entraîner des déséquilibres et des nausées chez l'utilisateur.

La cinétose, bien qu'elle se manifeste différemment par ses symptômes, peut également donner lieu à des réponses physiologiques similaires, ce qui accentue encore davantage la complexité de la différenciation. Par conséquent, des méthodologies analytiques plus sophistiquées et une collecte de données plus diversifiée semblent nécessaires pour distinguer plus précisément le stress de ces phénomènes au sein de notre étude.

### **Interprétation des conflits dans les profils**

L'interprétation des conflits au sein des masses de croyances des profils représente un défi majeur dans notre approche d'entraînement en réalité virtuelle. Actuellement, nous nous efforçons de gérer les contradictions et les incohérences potentielles présentes dans les profils des apprenants, mais il reste nécessaire d'explorer des stratégies plus élaborées pour évaluer ces conflits. Une amélioration envisageable serait l'introduction d'un calcul de valeur de confiance, basé sur le nombre de conflits détectés dans le profil. En attribuant un niveau de confiance à chaque croyance en fonction de son degré de contradiction avec les autres croyances, nous pourrions potentiellement identifier des profils distincts et mieux comprendre les variations individuelles en matière de gestion du stress. Cette approche permettrait ainsi de quantifier et de hiérarchiser les degrés de cohérence dans les profils, facilitant une analyse plus fine et une meilleure adaptation des séances d'entraînement en fonction des caractéristiques individuelles de chaque apprenant.

Le problème de contradiction qui peut se manifester dans les profils des apprenants peut être abordé de deux manières différentes. Tout d'abord, si une contradiction similaire est observée chez l'ensemble des apprenants, cela pourrait être attribué à un problème inhérent à la taxonomie utilisée pour organiser les informations dans l'environnement virtuel. Dans ce cas, il serait essentiel de réévaluer la structure de la taxonomie afin de corriger les incohérences et de garantir une représentation plus précise et cohérente des connaissances en matière de gestion du stress.

D'un autre côté, si une contradiction est présente chez une seule personne, il serait opportun de considérer l'introduction d'un calcul de valeur de confiance pour évaluer le profil. En attribuant un niveau de confiance aux croyances en fonction de leur cohérence ou de leur degré de contradiction, nous pourrions mieux comprendre les variations individuelles dans les profils. Un profil présentant de multiples contradictions pourrait être associé à un niveau de confiance plus faible, tandis qu'un profil plus cohérent pourrait être associé à un niveau de confiance plus élevé.

En considérant ces deux aspects, nous pourrions améliorer l'efficacité de notre approche d'entraînement en réalité virtuelle en identifiant et en résolvant les problèmes de contradiction.

Nous pourrions également avoir recours à une ontologie pour décrire précisément l'état complet des situations de crise afin de détecter d'éventuelles similarités dans ces conflits qui ne seraient ni la cause d'une tâche, ni la cause d'un stresser. En effet, notre taxonomie ne nous permet pas de représenter l'ensemble de tous les éléments d'une même scène d'entraînement, mais uniquement la tâche et les différents stressers que nous avons énumérés. Il n'est alors pas possible de détecter la source du stress si celle-ci provient d'un élément du décor, par exemple.

### **Historique des masses de croyance**

L'amélioration de la gestion des croyances dans le temps constitue un aspect important des améliorations de notre approche. Une première piste d'amélioration consiste à intégrer un mécanisme de dégradation progressive des croyances sur les compétences qui sont plus datées. En effet, certaines compétences peuvent évoluer et changer avec le temps en raison de l'expérience de l'apprenant.

En dégradant les croyances anciennes sur les compétences, nous pourrions maintenir notre approche à jour et garantir une représentation plus fidèle des connaissances actuelles en matière de gestion du stress dans une situation stressante particulière. Cela permettrait également de mettre l'accent sur les compétences les plus pertinentes et les plus utiles pour les apprenants, en évitant de surcharger les séances d'entraînement avec des informations dépassées ou moins importantes.

Cependant, il est important de considérer le degré de dégradation des croyances et d'évaluer la pertinence des compétences à dégrader en fonction de leur durée de validité et de leur évolution dans le temps. Une approche équilibrée et adaptative de la dégradation des croyances serait nécessaire pour maintenir une juste balance entre la conservation des connaissances fondamentales et l'intégration des nouvelles avancées.

Lors de la fusion des masses de croyances, une seconde amélioration possible serait de donner plus de poids à la nouvelle masse de croyance par

rapport aux masses de croyances précédentes. En effet, les croyances nouvellement acquises ou mises à jour peuvent être plus pertinentes et représentatives de l'état actuel des compétences de l'apprenant. En accordant davantage d'importance aux nouvelles croyances, nous pourrions mieux refléter l'évolution des connaissances et des compétences de l'individu dans le temps.

Ce poids accru aux nouvelles croyances pourrait également favoriser une plus grande flexibilité et adaptabilité de notre approche. Cela contribuerait à maintenir un apprentissage dynamique et évolutif, en tenant compte des progrès et des mises à jour constantes des compétences de chaque individu.

### **Génération des masses de croyance**

Pour améliorer la création des masses de croyances selon les résultats et les performances des apprenants, une voie prometteuse à explorer est l'utilisation d'algorithmes plus précis et sophistiqués, notamment en s'appuyant sur des techniques de machine learning. Actuellement, la création des masses de croyances s'appuie sur des informations issues des séances d'entraînement en réalité virtuelle. Nous pourrions améliorer la précision et la robustesse de ce processus en utilisant ces autres méthodes.

Le deep learning est une branche de l'intelligence artificielle qui permet d'entraîner des modèles à partir de grandes quantités de données pour effectuer des tâches spécifiques, comme la classification ou la prédiction. En utilisant des réseaux de neurones profonds, nous pourrions créer des modèles capables d'analyser les performances des apprenants et de générer des masses de croyances plus adaptées à leur niveau de compétence.

Ces modèles de deep learning pourraient également prendre en compte des facteurs supplémentaires afin de mieux appréhender leur état de stress et d'adapter les séances d'entraînement en conséquence. En intégrant ces informations supplémentaires dans le processus de création des masses de croyances, nous pourrions offrir des expériences d'apprentissage encore plus personnalisées et efficaces.

Cependant, l'utilisation de techniques de deep learning nécessite des ensembles de données volumineux et représentatifs, ainsi qu'une expertise en matière de modélisation et d'entraînement de réseaux de neurones. De ce fait, des études approfondies et de nombreuses expérimentations seront nécessaires pour valider l'efficacité et la pertinence de ces algorithmes plus précis.

Les bornes de la ZPD et de la ZDA sont généralement choisies de manière arbitraire dans notre approche. Cependant, cette approche arbitraire pourrait être repensée en utilisant des techniques informatiques avancées ou en laissant au formateur la possibilité de les personnaliser.

L'utilisation couplée de techniques de machine learning pourrait permettre de déterminer de manière plus précise les bornes de la ZPD et de la ZDA en fonction des performances réelles de chaque apprenant. En analysant

les données comportementales, les réponses physiologiques et les résultats des séances d'entraînement, ces techniques pourraient évaluer de façon dynamique et adaptative le niveau de compétence de l'apprenant et ainsi ajuster les bornes en conséquence.

De plus, offrir au formateur la possibilité de personnaliser les bornes de la ZPD et de la ZDA serait également une approche intéressante. En permettant au formateur de définir ces bornes en fonction des caractéristiques spécifiques de ses apprenants, des objectifs et des contraintes pédagogiques, nous pourrions obtenir une approche plus flexible et adaptable aux différents contextes d'apprentissage.

### **9.1.3 Comparaison et validation**

Une piste d'amélioration cruciale pour renforcer la fiabilité et la validité de notre approche consisterait à étendre la validation des profils sur un nombre de personnes bien plus important que ce que nous avons réalisé jusqu'à présent. En effet, la validation des profils sur un échantillon restreint d'apprenants peut être sujet à des biais statistiques et ne pas refléter la diversité des profils et des réponses individuelles face au stress, comme nous l'avons montré.

En augmentant considérablement la taille de l'échantillon de validation, nous pourrions mieux appréhender les variations individuelles et les tendances globales en matière de gestion du stress. Une plus grande diversité d'individus permettrait d'obtenir des données plus robustes et représentatives, ce qui permettrait de plus facilement rendre généralisable notre système. Cela nous permettrait également de tester l'ensemble du profil sur un panel de stressseurs bien plus important.

De plus, en élargissant l'échantillon de validation, nous pourrions mieux détecter d'éventuelles anomalies ou sous-groupes spécifiques qui nécessitent une attention particulière. Cela nous permettrait d'identifier des profils atypiques ou des caractéristiques spécifiques de certains individus qui pourraient bénéficier d'une adaptation plus personnalisée de l'entraînement.

Cependant, une telle expansion de l'échantillon de validation nécessiterait des ressources importantes en termes de collecte de données, de traitement et d'analyse. Des collaborations avec des institutions de recherche, des centres de formation et des organisations professionnelles pourraient faciliter cette démarche et garantir une représentation adéquate des diverses populations concernées.

Après avoir mené des expérimentations supplémentaires avec un échantillon de personnes plus large et diversifié, nous serions en mesure de comparer de manière plus efficace notre approche d'entraînement en réalité virtuelle avec celles déjà présentes dans la littérature scientifique.

En analysant les résultats obtenus auprès d'un plus grand nombre d'apprenants et en les comparant avec les études antérieures, nous pourrions

mettre en évidence les spécificités et les performances uniques de notre approche. De plus, en confrontant nos résultats à ceux d'autres approches, nous pourrions identifier les points forts et les limites de chacune d'entre elles, ce qui nous permettrait de développer une perspective plus éclairée sur l'état de l'art en matière d'entraînement aux situations de crise en réalité virtuelle. Cela nous offrirait également la possibilité de proposer des améliorations ou des ajustements à notre approche en fonction des enseignements tirés de ces comparaisons.

De plus, de nouvelles études permettraient de répondre à plusieurs hypothèses qui se sont posées suite à l'analyse de nos propres résultats. Il serait intéressant de tester plus en profondeur les différences relatives à la compréhension d'un scénario selon s'il est explicite ou implicite, et contrôlé ou non contrôlé, en menant une étude sur quatre groupes différents. Il serait également intéressant de pouvoir mener ces expérimentations afin de comprendre les mécanismes mis en place par un individu pour projeter sa propre vision du monde et sa propre compréhension de l'environnement qui l'entoure.

### **Interface formateur**

L'ajout de la visualisation continue du stress et des résultats de l'apprenant dans l'interface du formateur représenterait une piste d'amélioration pour notre approche. En intégrant cette fonctionnalité, le formateur serait en mesure de suivre en temps réel l'évolution du niveau de stress de chaque apprenant pendant les séances d'entraînement. Cela permettrait de mieux appréhender la progression individuelle et d'identifier les moments de pic de stress ou de réussite, offrant ainsi une rétroaction en temps réel plus précise et ciblée.

La visualisation continue des résultats de l'apprenant permettrait également au formateur de mieux comprendre les facteurs qui influencent les performances et le niveau de stress de chaque individu. En observant les réponses comportementales, les réactions physiologiques et les performances dans l'environnement virtuel, le formateur pourrait ajuster de manière proactive les séances d'entraînement pour répondre aux besoins spécifiques de chaque apprenant grâce aux outils que nous lui proposons.

Cependant, il est important de considérer les aspects liés à la confidentialité et à la sécurité des données, étant donné que la visualisation continue du stress et des résultats implique la collecte et le traitement en temps réel d'informations sensibles sur les apprenants. Des mesures de protection des données et des protocoles de confidentialité stricts devraient être mis en place pour garantir le respect de la vie privée et la sécurité des informations recueillies relevant du domaine de la santé, et qui pourraient porter préjudice à l'utilisateur si celles-ci étaient utilisées de manière malintentionnée. Notamment, les données issues des électrocardiogrammes sont sensibles, car elles peuvent permettre de révéler beaucoup d'éléments de l'individu en cas d'étude approfondie.

### 9.1.4 Perspective de la scénarisation

Une approche prometteuse pour prendre en compte en temps réel les données serait de développer des algorithmes de création automatique des structures représentant les classes de situation sous forme d'éléments scénaristiques. Actuellement, la conception des fragments est réalisée manuellement, ce qui peut être chronophage et sujet à des biais créatifs. En utilisant des techniques de traitement automatique, nous pourrions créer des modèles qui analysent les données des capteurs, les performances des apprenants et les interactions dans l'environnement virtuel pour identifier des motifs et des situations spécifiques.

Ces algorithmes pourraient ensuite générer automatiquement des éléments scénaristiques adaptés à chaque situation, en fonction des réponses et des comportements de l'apprenant. En utilisant des algorithmes de création automatique de scénarios ou des planificateurs, nous pourrions également explorer de nouvelles situations ou combinaisons d'éléments scénaristiques qui pourraient être plus efficaces pour l'entraînement au stress. Cette approche offrirait une plus grande flexibilité et une adaptation plus fine, tout en permettant une évolution constante de l'environnement d'apprentissage en fonction des données en temps réel.

Cependant, le développement de tels algorithmes nécessiterait des efforts importants en matière de recherche et de développement, ainsi que des évaluations rigoureuses pour assurer leur pertinence et leur efficacité dans le cadre de notre approche d'entraînement en réalité virtuelle. D'autres travaux mettent en avant de tels algorithmes, notamment en matière de tension narrative [O'Neill and Riedl, 2014; Cheong and Young, 2015], et il serait intéressant de pouvoir adapter ces propositions à nos propres travaux.

#### Perspectives - Résumé

Plusieurs pistes d'amélioration ont été explorées durant la conception et la mise en oeuvre de ce profil dynamique du stress mais qui, faute de temps, n'ont pas pu être mises en place. Ces éléments non implémentés auraient eu pour but une prise en compte plus précise de certains phénomènes liés à l'apprentissage, à l'entraînement et ainsi permettre au formateur de disposer de plus d'outils pour sa pédagogie.

Principalement, nous aurions souhaité ajouter un phénomène de diminution des croyances au fil du temps, reflétant la perte de connaissance sur le long terme en cas de non-entraînement, permettant ainsi d'informer le formateur de la nécessité de retravailler une compétence après un certain temps, ou de le faire automatiquement dans le cadre de la génération d'un scénario.

De plus, la création actuelle des masses de croyance se faisant arbitrairement, un travail supplémentaire plus précis autour de la

transformation de la réussite ou de l'échec de l'apprenant permettrait d'obtenir un profil dans lequel nous pourrions avoir une encore plus grande confiance.

Afin de parfaire le module de scénarisation dynamique, plusieurs pistes ont été explorées durant sa conception et sa mise en oeuvre :

- Prise en compte en temps réel des données des capteurs ;
- Prise en compte en temps réel des observables ;

Aussi, il serait intéressant de pouvoir créer dynamiquement les différentes représentations des classes de situation sous forme de fragment de manière automatique, afin de réduire la charge d'authoring manuel.

# Chapitre 10

## Éthique

L'éthique joue un rôle fondamental dans la conception, le développement et la mise en œuvre de toute recherche scientifique. Nos travaux n'échappent pas à ces réflexions approfondies sur les implications éthiques potentielles de nos actions. Cette section vise à explorer les questions éthiques qui se posent tout au long du processus de réalisation de notre profil, en mettant l'accent sur l'impact sur les individus.

### 10.0.1 Individu et stress

L'introduction délibérée du stress dans notre projet repose sur une intention scientifique spécifique. Il est important de clarifier les raisons pour lesquelles le stress est utilisé comme composante essentielle de notre approche.

L'objectif de notre approche est d'entraîner les individus aux situations de crise tout en leur permettant d'appliquer des méthodes de gestion de leur stress de manière efficace, ce qui implique une exposition contrôlée au stress dans un premier temps. Cette démarche est justifiée par des bases scientifiques et repose sur des théories et des études mettant en évidence l'intérêt de l'exposition au stress que nous avons pu observer dans notre état de l'art [Finseth et al., 2018; McClure et al., 2019]. Lorsqu'elle est adaptée et encadrée, l'exposition au stress peut favoriser l'apprentissage de mécanismes d'adaptation et de résilience, permettant ainsi de diminuer le stress à long terme.

L'introduction délibérée du stress dans notre approche d'apprentissage peut présenter certains risques pour les individus impliqués. Il est essentiel de reconnaître et d'évaluer ces risques afin de mettre en place des mesures d'atténuation appropriées et d'assurer la sécurité et le bien-être des participants. L'introduction excessive de stress chez les participants peut avoir des conséquences néfastes sur leur bien-être psychologique et émotionnel. Des niveaux de stress incontrôlés et prolongés peuvent augmenter le risque

de développement de troubles anxieux, de dépression, voir de chocs post-traumatiques [Yehuda and McFarlane, 1997] chez certaines personnes sensibles.

Afin de prévenir tout risque de stress excessif ou de choc post-traumatique, nous avons mis en place des mécanismes d'arrêt lors des séances d'entraînement. Si le niveau de stress atteint par l'individu est trop intense, le formateur a la possibilité d'arrêter les entraînements depuis l'application de gestion. Cette approche permet de préserver la sécurité émotionnelle des participants et d'éviter une exposition prolongée à des niveaux de stress dommageables. Il est à noter que des travaux sont réalisés afin de permettre une détection automatique et fiable du niveau de stress en temps réel, permettant d'accroître la fiabilité de la prévention de ces risques.

Nous avons également développé le système permettant d'ajuster dynamiquement le niveau de difficulté de l'entraînement en fonction des réactions émotionnelles et physiologiques de chaque individu afin de répondre à ce besoin. Cette personnalisation de l'expérience vise à maintenir un état de stress bénéfique, propice à l'apprentissage de mécanismes d'adaptation, tout en évitant des niveaux de stress excessifs qui pourraient être préjudiciables.

Dans le cadre des expérimentations, les candidats sont soigneusement sélectionnés en fonction de leur capacité à gérer ce type d'exercice. De plus, un consentement éclairé est recueilli, où les participants sont informés des objectifs, des risques et des avantages potentiels de l'expérimentation.

De plus, notre approche vise à être proposée à des individus qui ont une expérience préalable dans des contextes professionnels impliquant la gestion du stress. Les participants bénéficient d'un suivi psychologique régulier dans le cadre professionnel dans lequel ils évoluent habituellement. Cela permet de fournir un soutien approprié tout au long de leur implication dans l'entraînement au stress.

### **Individu et Stress - Résumé**

Notre approche d'apprentissage de la gestion du stress par l'induction contrôlée du stress dans un environnement virtuel repose sur une série de mesures d'atténuation soigneusement conçues pour garantir l'éthique et la sécurité des participants. Les protocoles d'interruption des entraînements en cas de stress excessif, l'ajustement dynamique du niveau de difficulté, la sélection appropriée des participants et le suivi psychologique régulier démontrent notre engagement envers le bien-être émotionnel des individus impliqués dans notre étude.

Cependant, il convient de noter que, malgré nos efforts, le risque zéro n'est pas réalisable. L'utilisation délibérée du stress dans notre approche soulève des interrogations éthiques légitimes. Ainsi, une analyse constante des avantages potentiels en rapport avec les risques encourus est essentielle.

Par conséquent, notre approche repose sur une approche éthique rigoureuse, mettant l'accent sur la transparence et l'adaptabilité face aux résultats observés.

### **10.0.2 Individu et utilisation d'un entraînement en réalité virtuelle**

L'utilisation croissante des casques de réalité virtuelle dans le cadre d'entraînements et d'apprentissages suscite un intérêt grandissant. Cependant, cette technologie immersive soulève des préoccupations éthiques importantes en raison des risques potentiels qu'elle comporte pour les utilisateurs [Anses, 2021; Souchet et al., 2022a,b].

L'objectif de notre approche est de fournir des entraînements à la gestion du stress en utilisant la réalité virtuelle. Cette méthode d'entraînement offre la possibilité de simuler des scénarios complexes et réalistes, qui seraient généralement difficiles à recréer dans un environnement traditionnel. En tirant parti des avantages de l'immersion et de l'interaction liés à la réalité virtuelle, notre approche vise à offrir des séances d'entraînement plus efficaces et ciblées, permettant aux individus d'apprendre et de développer des compétences essentielles pour gérer le stress dans des circonstances réelles, mais dans un environnement sécurisé et contrôlé. En utilisant cette technologie, nous aspirons à améliorer les capacités d'adaptation des participants, à renforcer leur résilience face aux défis et à favoriser leur bien-être émotionnel dans des contextes professionnels et personnels exigeants.

L'utilisation d'un environnement virtuel pour l'apprentissage ou l'entraînement soulève des inquiétudes quant à la fiabilité et à l'exactitude des informations transmises aux apprenants. Si la conception de l'environnement virtuel n'a pas été réalisée en étroite collaboration avec des formateurs qualifiés, il existe un risque de fournir des informations erronées ou des connaissances inappropriées aux apprenants. Cela peut entraîner une distorsion des informations et une assimilation de mauvaises croyances, compromettant ainsi la qualité de l'apprentissage. Cependant, il est à noter que la création d'un monde ouvert, bien que créé en collaboration avec des spécialistes, peut faire émerger des scénarios non-prévus grâce à la liberté offerte à l'utilisateur. De ce fait, il existe toujours un risque de faire émerger des conséquences non-voulues par le formateur suite à une utilisation d'un environnement en total liberté.

De plus, l'utilisation prolongée de la réalité virtuelle peut entraîner des problèmes de fatigue visuelle chez les utilisateurs. Les casques de réalité virtuelle imposent une proximité constante des écrans aux yeux, ce qui peut provoquer une fatigue oculaire accrue [Souchet, 2020]. De plus, une exposition prolongée à des environnements virtuels peut entraîner des troubles de la vision, tels que des difficultés d'accommodation ou des problèmes de

convergence. Ces effets indésirables peuvent compromettre le confort et la santé visuelle des utilisateurs.

La cinétose est un autre phénomène qui peut provoquer des problèmes de santé chez les utilisateurs lorsqu'ils sont exposés à des environnements virtuels. Les effets du mal du simulateur peuvent varier en fonction de la sensibilité individuelle, de la durée d'exposition et de l'intensité des stimuli visuels. Cette condition peut être particulièrement préoccupante dans les environnements virtuels immersifs où les mouvements de la tête et du corps peuvent entraîner des sensations visuelles rapides et discordantes. Il est ainsi crucial d'être conscient de ce problème lors de la conception et de l'utilisation de la réalité virtuelle, et de prendre des précautions pour limiter la survenue du mal du simulateur afin de préserver la santé et le confort des utilisateurs.

Dans notre projet, des mécanismes de protection ont été mis en place pour préserver le bien-être des utilisateurs lors de l'utilisation de la réalité virtuelle. Avant de permettre à un individu de participer aux séances d'entraînement, nous avons réalisé une évaluation préliminaire pour nous assurer qu'il ne présentait pas de troubles visuels préexistants ou de susceptibilité à la cinétose.

En outre, nous avons adopté des sessions d'entraînement courtes pour limiter la surexposition des apprenants dans le casque. Cette pratique vise à réduire les risques potentiels de fatigue visuelle et de troubles vestibulaires pouvant survenir lors d'une exposition prolongée à des environnements virtuels. En déterminant une durée adaptée d'utilisation, nous cherchons à maximiser les bénéfices de l'entraînement tout en minimisant les risques pour la santé physique et mentale des participants. Cependant, notre expérimentation tend à montrer que les durées d'exposition à l'environnement étaient trop courtes pour obtenir des résultats satisfaisants. Une étude plus poussée sur un système de gestion automatique des durées d'exposition serait ainsi intéressante à mener afin de trouver la limite de chaque individu.

Par ailleurs, nous avons pris soin de collaborer étroitement avec des experts du domaine lors de la création de l'environnement virtuel. Cette collaboration essaye d'assurer la précision et la qualité des informations transmises aux apprenants, et tente d'écarter ainsi le risque de transmission de fausses connaissances ou de croyances inappropriées. En impliquant des formateurs qualifiés, nous nous efforçons de concevoir des scénarios d'entraînement réalistes et pertinents, tout en prenant en compte les problèmes éthiques évoqués précédemment.

### **Individu et utilisation d'un entraînement en réalité virtuelle - Résumé**

Notre approche d'entraînement en réalité virtuelle vise à fournir des séances de gestion du stress en recréant des situations difficiles à reproduire dans la vie réelle. Cependant, l'utilisation de la réalité virtuelle soulève certains problèmes éthiques qui nécessitent une attention

particulière.

Afin de prévenir les problèmes éthiques évoqués, plusieurs mécanismes ont été mis en place dans notre approche d'entraînement en réalité virtuelle. Une évaluation permet d'identifier les individus présentant des troubles visuels préexistants ou une susceptibilité à la cinétose permettant de préserver la santé et le confort des utilisateurs en prévenant des risques possibles. En outre, pour minimiser les risques de fatigue visuelle et de problèmes vestibulaires liés à une utilisation prolongée, nous avons opté pour des sessions d'entraînement courtes et ciblées. Cette approche permet de tirer profit des avantages de la réalité virtuelle tout en limitant l'exposition prolongée aux environnements virtuels. Enfin, la collaboration étroite avec des experts du domaine lors de la création des environnements virtuels garantit l'exactitude et la qualité des informations transmises aux apprenants. Cette collaboration professionnelle contribue à la fiabilité et à la pertinence des connaissances acquises par les participants.

Ces mesures de protection ont été mises en œuvre pour garantir la sécurité et le bien-être des utilisateurs tout en préservant l'éthique de notre approche. Cependant, il est essentiel de rester attentif à l'évolution des recommandations en matière de santé et d'utilisation de la réalité virtuelle.

### 10.0.3 Gestion des données des individus

L'avènement de nouvelles technologies, telles que la réalité virtuelle et les dispositifs de suivi physiologique, a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de la formation et du développement personnel. Cependant, ces avancées soulèvent des préoccupations éthiques majeures concernant la gestion des données personnelles [Stérin, 2018], en particulier celles liées aux mesures physiologiques des individus. Lorsque des dispositifs de suivi physiologique sont utilisés dans un contexte de formation ou d'entraînement, des données sensibles telles que les signes vitaux, les réponses émotionnelles et les paramètres physiologiques peuvent être collectées et analysées [Stoeklé et al., 2019].

L'analyse de ces questions éthiques est essentielle pour garantir une approche éthiquement responsable et respectueuse de la vie privée tout en exploitant le potentiel des technologies de suivi physiologique pour un apprentissage ou un entraînement plus personnalisés et efficaces.

Dans le cadre de notre approche, nous collectons des données personnelles sensibles auprès des participants, y compris des informations sur certaines maladies cardiovasculaires, des problèmes de vision ou de peau. Cette collecte de données est essentielle pour évaluer l'admissibilité des individus

aux entraînements ou aux expérimentations menées afin de valider notre approche. En tenant compte de ces informations médicales, nous pouvons exclure les personnes présentant des conditions préexistantes qui pourraient être incompatibles avec les séances d'entraînement en réalité virtuelle ou qui pourraient être exposées à des risques pour leur santé. En outre, nous recueillons des données comportementales grâce à l'utilisation de l'environnement virtuel, ce qui nous permet d'analyser les réponses et les actions des participants lorsqu'ils sont confrontés à des situations stressantes ou stimulantes. Ces données comportementales fournissent des informations importantes pour évaluer les performances et les réactions émotionnelles des individus pendant l'entraînement.

Outre les données médicales et comportementales, nous captions également des données physiologiques pour évaluer l'état de stress des apprenants. Les dispositifs de suivi physiologique nous permettent d'enregistrer des paramètres tels que la fréquence cardiaque, la conductance cutanée et d'autres réponses physiologiques. Ces mesures sont cruciales pour évaluer l'intensité du stress ressenti par les participants pendant les sessions d'entraînement en réalité virtuelle. En analysant ces données physiologiques, nous pouvons mieux comprendre les niveaux de stress individuels et adapter les séances d'entraînement en conséquence, en veillant à ce que chaque individu bénéficie d'un apprentissage adapté à son état émotionnel et physiologique.

La gestion des données personnelles dans notre approche d'entraînement en réalité virtuelle soulève des problèmes complexes en termes de respect de la réglementation sur la protection des données, telle que le Règlement général sur la protection des données (RGPD), ainsi que des questions éthiques liées à la détection potentielle de maladies, notamment cardiovasculaires, à travers l'enregistrement des électrocardiogrammes et d'autres données physiologiques.

Le RGPD établit des principes fondamentaux concernant la collecte, le traitement et la conservation des données personnelles afin de protéger la vie privée des individus. Dans le contexte de notre approche, la collecte de données médicales sensibles, telles que les maladies cardiovasculaires préexistantes, requiert une attention particulière quant à l'obtention du consentement éclairé des participants et à l'utilisation légitime de ces données pour les objectifs spécifiques d'entraînement et d'évaluation.

De plus, l'enregistrement des ECG et d'autres données physiologiques pour évaluer l'état de stress des participants peut susciter des préoccupations éthiques en raison de la possibilité de détecter des conditions de santé préexistantes ou latentes. Une telle détection pourrait avoir des conséquences significatives sur la vie des individus, notamment en matière de diagnostic, de traitement médical et d'assurance. Par conséquent, il est primordial d'établir des protocoles clairs pour la gestion de ces données sensibles, en garantissant la confidentialité et la sécurité des informations médicales des participants, ainsi qu'en s'assurant que les données sont utilisées de manière responsable et avec le consentement éclairé des individus concernés.

Dans notre travail, nous avons veillé à respecter scrupuleusement les principes du RGPD et à adopter une approche éthique et responsable dans la gestion des données personnelles des participants. Nous avons informé clairement les individus des types de données collectées, des objectifs spécifiques de leur utilisation et des droits qu'ils ont sur leurs données. La collecte et l'utilisation des données médicales et physiologiques ont été effectuées avec le consentement éclairé des participants, et toutes les mesures de sécurité ont été mises en place pour protéger la confidentialité de ces informations.

Accordant une importance primordiale à la confidentialité et à la protection des données personnelles des participants, nous garantissons la confidentialité des informations. Chaque donnée collectée est anonymisée et dissociée de toute identification directe de l'individu.

De plus, nous accordons une grande importance au respect des droits des participants concernant leurs données personnelles. Chaque participant a le droit d'accéder à ses propres données recueillies au cours de l'expérimentation en réalité virtuelle, mais également le droit de demander la suppression de leurs données à tout moment comme indiqué dans la lettre d'information transmise lors des expérimentations. De ce fait, nous nous sommes engagés à répondre à toutes les demandes d'accès ou de suppression de données, en respectant les délais et les procédures établis par la réglementation sur la protection des données.

Il est essentiel de noter que dans notre travail, nous n'avons pas analysé les données dans le but de détecter de potentielles maladies ou de réaliser des diagnostics médicaux. La collecte de données physiologiques, y compris les électrocardiogrammes, était utilisée uniquement pour évaluer l'état de stress des participants pendant les séances d'entraînement en réalité virtuelle.

### **Gestion des données des individus - Résumé**

Dans le cadre de notre travail, nous avons rigoureusement respecté toutes les préconisations éthiques et les mesures de protection des données. L'anonymisation des données, l'obtention du consentement éclairé des participants, ainsi que l'accès et la suppression des données sur demande ont été scrupuleusement mis en place pour préserver la confidentialité et la sécurité des informations personnelles des individus impliqués.

Cependant, le développement et la diffusion d'un outil d'entraînement en réalité virtuelle soulèvent des questions éthiques plus vastes, notamment concernant la réutilisation de cet outil par des tiers. Si notre approche était partagée et utilisée ultérieurement par d'autres personnes ou organisations qui ne respecteraient pas les mêmes normes éthiques et les mesures de protection des données, cela pourrait entraîner des risques pour la vie privée et la sécurité des individus.

Ainsi, il est crucial d'être attentif à la façon dont notre approche est diffusée et utilisée, et de nous assurer que les mêmes principes éthiques et les normes de protection des données seront appliqués par tous les utilisateurs potentiels. Des directives claires et des politiques de protection des données devraient être établies pour encadrer la réutilisation de l'outil, garantissant ainsi la préservation de la vie privée et la confidentialité des données des utilisateurs.

# Bibliographie

- I. Albatish, M. J. Mosa, and S. S. Abu-Naser. Arduino tutor : An intelligent tutoring system for training on arduino. 2018.
- J. R. Anderson. Cognitive science series. the architecture of cognition, 1983.
- J. R. Anderson, C. F. Boyle, A. T. Corbett, and M. W. Lewis. Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial intelligence*, 42(1) :7–49, 1990.
- G. Andrade, G. L. Ramalho, A. S. Gomes, and V. Corruble. Dynamic game balancing : An evaluation of user satisfaction. *AIIDE*, 6 :3–8, 2006.
- Anses. Expositions aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée. 2021.
- R. Aylett. Narrative in virtual environments-towards emergent narrative. In *Proceedings of the AAI fall symposium on narrative intelligence*, pages 83–86, 1999.
- R. S. Aylett, S. Louchart, J. Dias, A. Paiva, and M. Vala. Fearnot!–an experiment in emergent narrative. In *Intelligent Virtual Agents : 5th International Working Conference, IVA 2005, Kos, Greece, September 12-14, 2005. Proceedings 5*, pages 305–316. Springer, 2005.
- P. Ayres. Something old, something new from cognitive load theory, 2020.
- M. Badaracco and L. Martínez. A fuzzy linguistic algorithm for adaptive test in intelligent tutoring system based on competences. *Expert Systems with Applications*, 40(8) :3073–3086, 2013.
- B.-C. Bae and R. M. Young. A use of flashback and foreshadowing for surprise arousal in narrative using a plan-based approach. In *Joint international conference on interactive digital storytelling*, pages 156–167. Springer, 2008.
- B.-C. Bae, Y.-G. Cheong, and D. Vella. Modeling foreshadowing in narrative comprehension for sentimental readers. In *International Conference on Interactive Digital Storytelling*, pages 1–12. Springer, 2013.
- H. M. S. Bakeer and S. S. Abu-Naser. An intelligent tutoring system for learning toefl. *International Journal of Academic Pedagogical Research (IJAPR)*, 12(2), 2019.

- C. Barot. Scénarisation d'environnements virtuels. vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité. 2014.
- C. R. Beal, I. M. Arroyo, P. R. Cohen, and B. P. Woolf. Evaluation of animal-watch : An intelligent tutoring system for arithmetic and fractions. *Journal of Interactive Online Learning*, 9(1), 2010.
- V. E. Beckner, D. M. Tucker, Y. Delville, and D. C. Mohr. Stress facilitates consolidation of verbal memory for a film but does not affect retrieval. *Behavioral neuroscience*, 120(3) :518, 2006.
- M. Benchekroun, D. Istrate, V. Zalc, and D. Lenne. Mmsd : A multi-modal dataset for real-time, continuous stress detection from physiological signals. In *HEALTHINF*, pages 240–248, 2022.
- S. H. Bevensee, K. A. Dahlsgaard Boisen, M. P. Olsen, H. Schoenau-Fog, and L. E. Bruni. Project aporia—an exploration of narrative understanding of environmental storytelling in an open world scenario. In *Interactive Storytelling : 5th International Conference, ICIDS 2012, San Sebastián, Spain, November 12-15, 2012. Proceedings 5*, pages 96–101. Springer, 2012.
- A. Biggs, P. Brough, and S. Drummond. Lazarus and folkman's psychological stress and coping theory. *The handbook of stress and health : A guide to research and practice*, pages 349–364, 2017.
- O. Binsch, C. Bottenheft, A. Landman, L. Roijendijk, and E. H. Vermetten. Testing the applicability of a virtual reality simulation platform for stress training of first responders. *Military Psychology*, 33(3) :182–196, 2021.
- S. Bouchard, F. Bernier, É. Boivin, B. Morin, and G. Robillard. Using biofeedback while immersed in a stressful videogame increases the effectiveness of stress management skills in soldiers. *PloS one*, 7(4) :e36169, 2012.
- Y. Bourrier. *Diagnostic et prise de décision pédagogique pour la construction de compétences non-techniques en situation critique*. PhD thesis, 2019. URL <http://www.theses.fr/2019S0RUS002>. Thèse de doctorat dirigée par Luengo, Vanda et Garbay, Catherine Informatique Sorbonne université 2019.
- A. Breier, M. Albus, D. Pickar, T. P. Zahn, O. M. Wolkowitz, and S. M. Paul. Controllable and uncontrollable stress in humans : alterations in mood and neuroendocrine and psychophysiological function. *The American journal of psychiatry*, 1987.
- C. Brod. *Technostress : The human cost of the computer revolution*. Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1984.
- J. F. Brosschot, B. Verkuil, and J. F. Thayer. Generalized unsafety theory of stress : Unsafe environments and conditions, and the default stress response. *International journal of environmental research and public health*, 15(3) :464, 2018.

- E. Brown and P. Cairns. A grounded investigation of game immersion. In *CHI'04 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 1297–1300, 2004.
- J.-M. Burkhardt, B. Bardy, and D. Lourdeaux. Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, 48 :35– 42, 01 2003.
- J.-M. Burkhardt, D. Lourdeaux, and D. Mellet-d'Huart. La réalité virtuelle pour l'apprentissage humain. *Le traité de la réalité virtuelle*, 4, 2006.
- L. Cahill, L. Gorski, and K. Le. Enhanced human memory consolidation with post-learning stress : Interaction with the degree of arousal at encoding. *Learning & memory*, 10(4) :270–274, 2003.
- J. Campbell. *The hero with a thousand faces*, volume 17. New World Library, 2008.
- K. Carpentier. *Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements virtuels pour la formation*. PhD thesis, Compiègne, 2015a.
- K. Carpentier. Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements virtuels pour la formation. 2015b.
- K. Carpentier and D. Lourdeaux. Generation of learning situations according to the learner's profile within a virtual environment. In *international conference on agents and artificial intelligence*, pages 245–260. Springer, 2013.
- M. Cavazza, F. Charles, and S. Mead. Character-based interactive storytelling. 17(4) :17–24, 2002. ISSN 1541-1672. doi : 10.1109/MIS.2002.1024747. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/1024747/>.
- R. Champagnat, G. Delmas, and M. Augeraud. A storytelling model for educational games : Hero's interactive journey. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 2(1-2) :4–20, 2010.
- D. Checa and A. Bustillo. A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. *Multimedia Tools and Applications*, 79 : 5501–5527, 2020.
- J. Chen. Flow in games (and everything else). *Communications of the ACM*, 50(4) :31–34, 2007.
- Y.-G. Cheong and R. M. Young. Suspenser : A story generation system for suspense. 7(1) :39–52, 2015. ISSN 1943-068X, 1943-0698. doi : 10.1109/TCIAIG.2014.2323894. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/6815689/>.
- O. Chernikova, N. Heitzmann, A. Opitz, T. Seidel, and F. Fischer. A theoretical framework for fostering diagnostic competences with simulations in higher education. *Learning to Diagnose with Simulations*, page 5, 2022.

- L. Chittaro and F. Buttussi. Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 21(4) :529–538, 2015.
- W. J. Clancey. Methodology for building an intelligent tutoring system. *Methods and tactics in cognitive science*, pages 51–84, 1984.
- R. Cohen and Y.-D. Law. Encyclopedia of clinical neuropsychology, 2011.
- S. Cohen, T. Kamarck, R. Mermelstein, et al. Perceived stress scale. *Measuring stress : A guide for health and social scientists*, 10(2) :1–2, 1994.
- G. Cosma, E. Ronchi, and D. Nilsson. Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation : A virtual reality experiment with oculus rift®. *Journal of Transportation Safety & Security*, 8(sup1) :101–117, 2016.
- A. D. Crosswell and K. G. Lockwood. Best practices for stress measurement : How to measure psychological stress in health research. *Health psychology open*, 7(2) :2055102920933072, 2020.
- M. Csikszentmihalyi. *Flow : The psychology of optimal experience*, volume 1990. Harper & Row New York, 1990.
- M. Csikszentmihalyi. *Finding flow : The psychology of engagement with everyday life*. Hachette UK, 2020.
- T. de Blauwe, N. Sabouret, and D. Lourdeaux. Méta-modèle d’agent pour la génération de comportements variables induits par des modèles cognitifs modulaires. In *30th Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2022)*, pages 103–112, 2022.
- A. P. Dempster. A generalization of bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological)*, 30(2) :205–232, 1968.
- A. P. Dempster. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. In *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*, pages 57–72. Springer, 2008.
- T. Denoeux. A k-nearest neighbor classification rule based on dempster-shafer theory. In *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*, pages 737–760. Springer, 2008.
- P. Dewe. Demand, resources, and their relationship with coping. *The handbook of stress and health : A guide to research and practice*, pages 427–442, 2017.
- P. J. Dewe, M. P. O’Driscoll, and C. L. Cooper. Theories of psychological stress at work. *Handbook of occupational health and wellness*, pages 23–38, 2012.
- A. L. Dougall and A. Baum. Stress, health, and illness. 2012.

- E. Duarte, F. Rebelo, J. Teles, and M. S. Wogalter. Behavioral compliance for dynamic versus static signs in an immersive virtual environment. *Applied ergonomics*, 45(5) :1367–1375, 2014.
- D. Dubois and H. Prade. *Possibility theory : an approach to computerized processing of uncertainty*. Springer Science & Business Media, 2012.
- L. Edward, D. Lourdeaux, and J.-P. Barthès. Virtual autonomous agents in an informed environment for risk prevention. In *International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 496–497. Springer, 2009.
- N. El-Kechaï. *Suivi et assistance des apprenants dans les environnements virtuels de formation*. PhD thesis, Le Mans, 2007.
- E. S. Epel, A. D. Crosswell, S. E. Mayer, A. A. Prather, G. M. Slavich, E. Puterman, and W. B. Mendes. More than a feeling : A unified view of stress measurement for population science. *Frontiers in neuroendocrinology*, 49 : 146–169, 2018.
- Z. Feng, V. A. González, R. Amor, R. Lovreglio, and G. Cabrera-Guerrero. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research : A systematic literature review. *Computers & Education*, 127 :252–266, 2018.
- G. Fink. *Encyclopedia of Stress : Index*, volume 4. Academic Press, 2007.
- T. Finseth, N. Barnett, E. A. Shirtcliff, M. C. Dorneich, and N. Keren. Stress inducing demands in virtual environments. 62(1) :2066–2070, 2018. ISSN 1541-9312. doi : 10.1177/1541931218621466. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1541931218621466>.
- R. H. Flin, P. O’Connor, and M. Crichton. *Safety at the Sharp End : A Guide to Non-technical Skills*. Ashgate Publishing, Ltd., 2008.
- J. A. Fodor. Precis of the modularity of mind. *Behavioral and brain sciences*, 8(1) :1–5, 1985.
- S. Gedam and S. Paul. A review on mental stress detection using wearable sensors and machine learning techniques. *IEEE Access*, 9 :84045–84066, 2021.
- A. J. Greimas. *Sémantique structurale : recherche de méthode*. Larousse, 1966.
- J. J. Kim and D. M. Diamond. The stressed hippocampus, synaptic plasticity and lost memories. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6) :453–462, 2002.
- S. Y. Kim, H. Park, H. Kim, J. Kim, and K. Seo. Technostress causes cognitive overload in high-stress people : Eye tracking analysis in a virtual kiosk test. *Information Processing & Management*, 59(6) :103093, 2022.

- M. Kinateder, M. Müller, M. Jost, A. Mühlberger, and P. Pauli. Social influence in a virtual tunnel fire—influence of conflicting information on evacuation behavior. *Applied ergonomics*, 45(6) :1649–1659, 2014.
- E. Kleinman, K. Caro, and J. Zhu. From immersion to metagaming : Understanding rewind mechanics in interactive storytelling. *Entertainment Computing*, 33 :100322, 2020.
- K. R. Koedinger and J. R. Anderson. Effective use of intelligent software in high school math classrooms. 1993.
- H. Koenitz, A. D. Pastena, D. Jansen, B. d. Lint, and A. Moss. The myth of ‘universal’ narrative models. In *International Conference on Interactive Digital Storytelling*, pages 107–120. Springer, 2018.
- J. Kupersmith. Technostress and the reference librarian. *Reference Services Review*, 1992.
- G. La Torre, A. Esposito, I. Sciarra, and M. Chiappetta. Definition, symptoms and risk of techno-stress : a systematic review. *International archives of occupational and environmental health*, 92(1) :13–35, 2019.
- R. Lacaze-Labadie, D. Lourdeaux, and M. Sallak. Génération de scénario : planification avec un opérateur défini par un modèle graphique. In *Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l’Apprentissage pour la conduite de systèmes (JFPDA 2018)*, 2018.
- P. Laforcade and Y. Laghouaouta. Une approche dirigée par les modèles pour la conception de générateurs de scénarios adaptés dans un jeu d’apprentissage. *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation*, 28(1) :81–116, 2021.
- P. Larivaille. L’analyse (morpho) logique du récit. *Poétique*, 19 :368–388, 1974.
- A. Latham, K. Crockett, and D. McLean. An adaptation algorithm for an intelligent natural language tutoring system. *Computers & Education*, 71 : 97–110, 2014.
- R. S. Lazarus and S. Folkman. *Stress, appraisal, and coping*. Springer publishing company, 1984.
- G. Levieux. *Mesure de la difficulté des jeux vidéo*. PhD thesis, Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, May 2011. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00612657/document>.
- C. Li, W. Liang, C. Quigley, Y. Zhao, and L.-F. Yu. Earthquake safety training through virtual drills. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4) :1275–1284, 2017.

- G. Lim and J.-D. Lee. Storytelling design for collaborative learning based on the hero's journey. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 8(8) :105–118, 2014.
- D. Lourdeaux, Z. Afoutni, M.-H. Ferrer, N. Sabouret, V. Demulier, J.-C. Martin, L. Bolot, V. Boccara, and R. Lelong. Victteams : a virtual environment to train medical team leaders to interact with virtual subordinates. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on IVA*, pages 241–243, 2019.
- R. Luckin, B. Du Boulay, et al. Ecolab : The development and evaluation of a vygotskian design framework. *International journal of artificial Intelligence in Education*, 10(2) :198–220, 1999.
- S. Lupien. *Par amour du stress*. Éditions Va savoir, 2020.
- S. Lupien and C. Auger. Le stress, une menace contre la performance. *Gestion*, 45(2) :80–84, 2020.
- B. Magerko. Story representation and interactive drama. In *AIIDE*, pages 87–92. Citeseer, 2005.
- S. Mailles. *COMPER-Une approche par compétences pour le diagnostic, la régulation et la personnalisation. Participation du Laboratoire LHUMAIN*. PhD thesis, Université de Montpellier 3, 2020.
- M. Malekzadeh, M. B. Mustafa, and A. Lahsasna. A review of emotion regulation in intelligent tutoring systems. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(4) :435–445, 2015.
- S. Mandin, N. Guin, and M. Lefevre. Modèle de personnalisation de l'apprentissage pour un eiah fondé sur un référentiel de compétences. In *7ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain-EIAH'2015*, 2015.
- M.-F. Marin, C. Raymond, and S. J. Lupien. Memory and stress. In *Stress : Physiology, Biochemistry, and Pathology*, pages 69–78. Elsevier, 2019.
- K. A. McClure, K. L. McGuire, and E. F. Loftus. Officers' memory and stress in virtual lethal force scenarios : Implications for policy and training. pages 1–19, 2019. ISSN 1068-316X, 1477-2744. doi : 10.1080/1068316X.2019.1652748. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1068316X.2019.1652748>.
- A. M. McCullough and A. P. Yonelinas. Cold-pressor stress after learning enhances familiarity-based recognition memory in men. *Neurobiology of Learning and Memory*, 106 :11–17, 2013.
- S. M. Monroe and G. Slavich. Psychological stressors : overview. *Stress : Concepts, cognition, emotion, and behavior*, pages 109–115, 2016.

- T. Murray and I. Arroyo. Toward measuring and maintaining the zone of proximal development in adaptive instructional systems. In *International conference on intelligent tutoring systems*, pages 749–758. Springer, 2002.
- S. S. A. Naser. Itsb : An intelligent tutoring system authoring tool. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(5), 2016.
- E. Nasiri Khoozani. *An ontological framework for the formal representation and management of human stress knowledge*. PhD thesis, Curtin University, 2011.
- B. O’Neill and M. Riedl. Dramatis : A computational model of suspense. In *Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2014.
- E. I. Papageorgiou and J. L. Salmeron. A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 21(1) : 66–79, 2012.
- J. Pearl. *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Elsevier, 2014.
- J. Piaget. *La naissance de l’intelligence chez l’enfant*. Delachaux et Niestlé Neuchatel-Paris, 1935.
- D. Pietraszewski and A. E. Wertz. Why evolutionary psychology should abandon modularity. *Perspectives on Psychological Science*, 17(2) :465–490, 2022.
- J. Porteous. Planning technologies for interactive storytelling. page 19, 2016.
- P. J. Potvin and R. W. Schutz. Statistical power for the two-factor repeated measures anova. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 32(2) :347–356, 2000.
- M. Prachyabrued, D. Wattanadhirach, R. B. Dudrow, N. Krairojananan, and P. Fuengfoo. Toward virtual stress inoculation training of prehospital healthcare personnel : A stress-inducing environment design and investigation of an emotional connection factor. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 671–679, 2019. doi : 10.1109/VR.2019.8797705. ISSN : 2642-5246.
- J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education : Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147 :103778, 2020.
- N. Rahmouni, D. Lourdeaux, A. Benabbou, and T. Bensebaa. Diag-skills : A diagnosis system using belief functions and semantic models in its. *Applied Sciences*, 11(23) :11326, 2021a.

- N. Rahmouni, D. Lourdeaux, A. Benabbou, and T. Bensebaa. La prise en compte de l'incertitude dans le processus de diagnostic des compétences de l'apprenant. In *10e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*, pages 202–213, 2021b.
- A. T. Revi, D. E. Millard, and S. E. Middleton. A systematic analysis of user experience dimensions for interactive digital narratives. In *International conference on interactive digital storytelling*, pages 58–74. Springer, 2020.
- M. Riedl and V. Bulitko. Interactive narrative : A novel application of artificial intelligence for computer games. In *Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2012.
- E. Ronchi, D. Nilsson, S. Kojić, J. Eriksson, R. Lovreglio, H. Modig, and A. L. Walter. A virtual reality experiment on flashing lights at emergency exit portals for road tunnel evacuation. *Fire technology*, 52 :623–647, 2016.
- D. Saredakis, A. Szpak, B. Birckhead, H. A. Keage, A. Rizzo, and T. Loetscher. Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays : a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in human neuroscience*, 14 :96, 2020.
- M. A. Sazma, A. M. McCullough, G. S. Shields, and A. P. Yonelinas. Using acute stress to improve episodic memory : The critical role of contextual binding. *Neurobiology of learning and memory*, 158 :1–8, 2019.
- P. Schmidt, A. Reiss, R. Duerichen, C. Marberger, and K. Van Laerhoven. Introducing wesad, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection. In *Proceedings of the 20th ACM international conference on multimodal interaction*, pages 400–408, 2018.
- N. Schneiderman, G. Ironson, and S. D. Siegel. Stress and health : psychological, behavioral, and biological determinants. *Annual review of clinical psychology*, 1 :607, 2005.
- H. Selye. *The stress of life*. 1956.
- G. Shafer. *A mathematical theory of evidence*, volume 42. Princeton university press, 1976.
- G. S. Shields, M. A. Sazma, A. M. McCullough, and A. P. Yonelinas. The effects of acute stress on episodic memory : A meta-analysis and integrative review. *Psychological bulletin*, 143(6) :636, 2017.
- P. Smets and R. Kennes. The transferable belief model. *Artificial intelligence*, 66(2) :191–234, 1994.
- A. Souchet. *Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle*. PhD thesis, 2020. URL

- <http://www.theses.fr/2020PA080002>. Thèse de doctorat dirigée par Azémard, Ghislaine et Leroy, Laure Sciences de l'information et de la communication Paris 8 2020.
- A. D. Souchet, D. Lourdeaux, A. Pagani, and L. Rebenitsch. A narrative review of immersive virtual reality's ergonomics and risks at the workplace : cybersickness, visual fatigue, muscular fatigue, acute stress, and mental overload. *Virtual Reality*, pages 1–32, 2022a.
- A. D. Souchet, S. Philippe, D. Lourdeaux, and L. Leroy. Measuring visual fatigue and cognitive load via eye tracking while learning with virtual reality head-mounted displays : A review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 38(9) :801–824, 2022b.
- C. D. Spielberger. Manual for the state-trait anxiety, inventory. *Consulting Psychologist*, 1970.
- A.-L. Stérin. Diffuser des données de la recherche dans le respect du droit et de l'éthique. *La diffusion numérique des données en SHS-Guide de bonnes pratiques éthiques et juridiques*, pages 299–302, 2018.
- H.-C. Stoeklé, J.-F. Deleuze, and G. Vogt. Society, law, morality and bioethics : A systemic point of view. *Ethics, Medicine and Public Health*, 10 :22–26, 2019.
- N. Szilas and U. Richle. Towards a computational model of dramatic tension. In *2013 Workshop on Computational Models of Narrative*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2013.
- A. Tchechmedjiev. State of the art : Local semantic similarity measures and global algorithmes for knowledge-based word sense disambiguation. In *Proceedings of the Joint Conference JEP-TALN-RECITAL 2012, volume 3*, pages 295–308, 2012.
- B.-M. Toussaint, V. Luengo, F. Jambon, and J. Tonetti. From heterogeneous multisource traces to perceptual-gestural sequences : The petra treatment approach. In *International conference on artificial intelligence in education*, pages 480–491. Springer, 2015.
- L. van Dammen, T. T. Finseth, B. H. McCurdy, N. P. Barnett, R. A. Conrady, A. G. Leach, A. F. Deick, A. L. Van Steenis, R. Gardner, B. L. Smith, et al. Evoking stress reactivity in virtual reality : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 138 :104709, 2022.
- R. Venant, C. Teyssié, D. Marquié, P. Vidal, and J. Broisin. A competency-based model to bridge the gap between academic trainings and industrial trades. In *2015 IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies*, pages 486–487. IEEE, 2015.

- L. S. Vygotsky. *Mind in society : The development of higher psychological processes*. Harvard university press, 1980.
- H. Walach, N. Buchheld, V. Buttenmüller, N. Kleinknecht, and S. Schmidt. Measuring mindfulness—the freiburg mindfulness inventory (fmi). *Personality and individual differences*, 40(8) :1543–1555, 2006.
- M. M. Weil and L. D. Rosen. *Technostress : Coping with technology@ work@ home@ play*, volume 13. J. Wiley New York, 1997.
- E. Wethington. *Theories of organizational stress*, 2000.
- B. G. Witmer and M. J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3) :225–240, 1998.
- O. T. Wolf. Stress and memory in humans : twelve years of progress? *Brain research*, 1293 :142–154, 2009.
- B. P. Woolf. *Building intelligent interactive tutors : Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*. Morgan Kaufmann, 2010.
- Z. Wu and M. Palmer. Verb semantics and lexical selection. *arXiv preprint cmp-lg/9406033*, 1994.
- R. E. Yehuda and A. C. McFarlane. *Psychobiology of posttraumatic stress disorder*. New York Academy of Sciences, 1997.
- R. M. Yerkes, J. D. Dodson, et al. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Punishment : Issues and experiments*, pages 27–41, 1908.
- L. A. Zadeh. Fuzzy sets. In *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems : selected papers by Lotfi A Zadeh*, pages 394–432. World Scientific, 1996.
- J. P. Zagal, M. Mateas, C. Fernández-Vara, B. Hochhalter, and N. Lichti. Towards an ontological language for game analysis. In *DiGRA Conference*, 2005.