



HAL
open science

Machines pour raconter

Anne-Gwenn Bosser

► **To cite this version:**

Anne-Gwenn Bosser. Machines pour raconter. Logique en informatique [cs.LO]. Sorbone Université, 2022. tel-03849657

HAL Id: tel-03849657

<https://hal.science/tel-03849657v1>

Submitted on 12 Nov 2022

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

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

**HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES DE SORBONNE
UNIVERSITÉ**

Présentée par

Anne-Gwenn Bosser

Titre :

Machines pour raconter

soutenue le 21 Octobre 2022

Devant le jury composé de :

Bruno ARNALDI	INSA Rennes	Rapporteur
Tristan CAZENAVE	Université de Paris Sciences et Lettres	Rapporteur
Pierre CHEVAILLIER	ENI Brest	Examineur
Olivier LAURENT	ENS Lyon	Rapporteur
Nicolas MAUDET	Sorbonne Université	Examineur

Résumé

Chez les humains, les histoires sont une forme de communication utilisée pour faire sens du monde et de ce qui nous arrive. À ce titre, la narration computationnelle a fourni la toile de fond pour plusieurs contributions à la représentation des connaissances. Elle propose également un cadre formel pour présenter des événements en suivant des objectifs communicationnels précis, mêlant causalité et affects. Lorsqu'elle se fait interactive, la narration peut représenter et prendre en compte le point de vue particulier des utilisatrices et utilisateurs des systèmes au sein d'applications engageantes, convaincantes. Je présente mes contributions à la formalisation des structures narratives et à leur manipulation grâce à la logique linéaire. Ces contributions ont pu être opérationnalisées au travers d'outils de preuve formelle, mais également à l'aide de langages de programmation dédiés. Je décris des applications concrètes du paradigme narratif dans le domaine du jeu et du jeu sérieux. Enfin, je trace quelques perspectives pour des travaux futurs qui mettront l'accent sur des aspects affectifs de la communication narrative, l'étude de ses effets (par exemple persuasifs), en particulier lors de leur intégration au sein d'applications immersives.

Remerciements

Je remercie Bruno Arnaldi, Tristan Cazenave et Olivier Laurent d'avoir bien voulu me faire l'honneur de rapporter ce manuscrit, ainsi que Nicolas Maudet et Pierre Chevaillier d'avoir participé au jury de soutenance, un jury qui a eu lieu en présence de tous, ce que je n'avais plus vu depuis 2019. Merci à Emmanuel Chailloux de m'avoir accueillie et aiguillée pour la préparation et la soutenance, ainsi que pour avoir fait la vaisselle après le traditionnel pot !

Je remercie du fond du cœur toutes les étudiantes et tous les étudiants qui ont choisi de faire un bout de chemin avec moi sur des projets de recherche. Votre motivation et curiosité nourrissent les miennes.

Je remercie également toutes mes collaboratrices et mes collaborateurs de ces dernières années, tout parsemés qu'ils sont sur la planète. Votre accueil, vos conseils, vos avis ont directement contribué à ce que je me lance et que j'aie au bout de cet exercice.

La disponibilité d'esprit nécessaire pour écrire et soutenir cette HDR n'aurait pas été possible sans le soutien de Mathieu et de ma famille, et sans la patience de mes trois filles envers leur mère souvent distraite et absente. Tout s'est donc bien fini (puisque j'écris ces lignes après la soutenance), grâce également au précieux soutien à l'ENIB de collègues enseignants-chercheurs et gestionnaires, qui m'ont soulagée de tâches administratives pendant la dernière ligne droite.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Parti pris	6
1.2	Organisation du mémoire	6
2	Narration Computationnelle et Logique Linéaire	8
2.1	La Logique Linéaire pour représenter les histoires interactives	8
2.1.1	Sérendipité	8
2.1.2	Modélisation de récits non-linéaires	9
2.1.3	Une preuve est une histoire	12
2.1.4	La fin d'Emma Bovary	15
2.1.5	Perspectives de ces travaux	19
2.2	Prouver les propriétés des histoires interactives	19
2.2.1	Travaux proches	20
2.2.2	Une interprétation narrative d'un sous-ensemble d'ILL	21
2.2.3	Utiliser l'assistant de Preuve Coq pour l'analyse de propriétés narratives	24
2.2.4	Limitations, Perspectives	25
2.3	Génération Narrative	26
2.3.1	Premiers pas : le système TeLLer	26
2.3.2	Langages de Programmation Logique Linéaire	26
2.3.3	Des structures de récit bien formés : mettre en évidence la structure causale des récits	27
2.3.4	Programmer un environnement narratif	27
2.3.5	Codage des Eléments narratifs	29
2.3.6	Programmer des environnements narratifs	33
2.3.7	Structures de récit générées	33
2.3.8	Perspectives	33
3	Raconter en Interaction dans des Systèmes	34
3.1	Mise en histoire (Storification) de traces d'actions localisées dans le temps et l'espace	34
3.1.1	Utiliser les récits pour faire sens : le cas du débriefing post-simulation	35
3.1.2	Description de l'architecture proposée	36
3.1.3	Construction du graphe narratif	38
3.1.4	Cas d'utilisation proposé	40
3.1.5	Travaux proches	42
3.1.6	Perspectives et travaux futurs	42
3.2	Pilotage des histoires interactives en RV	42

3.2.1	Déduire les réseaux de Petri	43
3.2.2	Annotations de temps	44
3.2.3	Verification de propriétés temporelles en utilisant les réseaux de Petri	44
3.3	Personnages Virtuels	44
3.3.1	Evaluer la crédibilité des Personnages Virtuels	45
3.3.2	Audiences Virtuelles	46
3.3.3	Perspectives de ces travaux	48
4	Perspectives et Applications	49
4.1	Déplacement : vers les utilisateurs et utilisatrices des systèmes	49
4.2	Modèles pour l'adaptation dynamique de la narration	50
4.2.1	Modéliser la cohérence affective	50
4.2.2	Guider l'expérience utilisateur dans un récit immersif	50
4.3	Comment raconter pour mieux communiquer ?	51
4.3.1	Compréhension Narrative	51
4.3.2	Dialogues narratifs	52
4.3.3	L'humour des interfaces	53
4.4	Applications	54
4.4.1	Usages	54
4.4.2	Raconter pour former, transformer et soigner	54

Table des figures

2.1	Le calcul des séquents en Logique Linéaire Intuitionniste	10
2.2	Déroulements alternatifs pour certaines étapes finales de Madame Bovary (la formule active pour chaque règle est en gras)	16
2.3	Définition des multiset de ressources	17
2.4	Fragment original du roman de Flaubert – Partie 1. Emma vend l’héritage Bovary par l’intermédiaire de Lheureux.	17
2.5	Fragment alternatif – Partie 1. La discussion avec Félicité lors de laquelle Emma apprend que Guillaumin pourrait l’aider se déroule plus tôt.	17
2.6	Fragment alternatif – Partie 2. Correctement investie avec l’aide de Guillaumin, l’héritage Bovary fournit un revenu temporaire, qui délaie les dettes d’Emma	18
2.7	Fragment correspondant au roman original de Flaubert – Partie 2. Emma accroît ses dettes jusqu’à l’insolvabilité. La discussion entre Emma et Félicité se produit trop tard pour qu’Emma puisse investir l’héritage Bovary, une fois les terrains vendus.	18
2.8	Fragment Narratif avec un branchement. Dans une interprétation <i>monde ouvert</i> , un événement externe (par exemple, une interaction utilisateur) décide de l’ordre de deux actions narratives : elles correspondent respectivement à la discussion entre Emma et Félicité, et à la vente des terrains hérités.	18
2.9	Catégories syntaxiques pour la spécification narrative sous forme de séquent.	21
2.10	Fonction d’interprétation d’une preuve en récit non linéaire ν : la fonction est définie récursivement à partir de la dernière règle ILL appliquée. $\nu_{A \multimap B}$ dénote l’action initialement spécifiée avec la formule $A \multimap B$	23
2.11	Les multiples fins d’Emma	24
2.12	Exemple de programme Celf : définition de 4 actions narratives à partir de ressources, d’un environnement initial, et d’une requête qui fera 3 tentatives pour produire la ressource <code>emmaCharlesMarried</code>	28
2.13	Une structure de récit générée à l’aide du programme Celf présenté Figure 2.12. Le nœud <code>init</code> représente l’environnement narratif initial. Les autres noeuds sont des actions narratives et représentent les relations de causalité inférées d’une analyse de la consommation des ressources. On labellise ici en plus les transitions avec le nom des ressources permettant la relation causale.	29
2.14	Extrait de code Celf, inspiré par un fragment de la nouvelle <i>Madame Bovary</i> [48]. Les types atomiques, correspondant aux ressources narratives, sont suivies par les types décrivant les actions narratives, puis par la déclaration de l’environnement initial, et enfin par une requête de 100 récits se terminant par la mort d’Emma. (Le fichier complet contient 105 lignes de code)	30

2.15	L'une des 41 structures causales de récits générés par le code Figure 2.14. Ces structures causales ont été exhibées à l'aide de l'outil <i>CelfToGraph</i> développé en collaboration avec Joao F. Ferreira, qui permet également de procéder à des requêtes simples sur les structures générées pour sélectionner les plus intéressantes. Les nœuds en gris sont des actions finales, qui n'auront plus de conséquences. Emma n'assiste pas au bal du Vicomte, mais a toujours ce désir d'échapper à sa vie telle qu'elle est. Elle se défenestre lorsque Rodolphe la quitte.	31
2.16	L'une des 41 structures causales de récits générés par le code Figure 2.14. Ces structures causales ont été exhibées à l'aide de l'outil <i>CelfToGraph</i> développé en collaboration avec Joao F. Ferreira, qui permet également de procéder à des requêtes simples sur les structures générées pour sélectionner les plus intéressantes. Les nœuds en gris sont des actions finales, qui n'auront plus de conséquences. Comme dans l'histoire d'origine, Emma assiste au bal du Vicomte. À la suite du départ de Rodolphe, elle tombe malade. Elle a une liaison avec Léon. Après sa ruine, elle ingère de l'arsenic.	32
3.1	Métaphore d'utilisation d'un outil de <i>sensemaking</i> narratif pour le <i>debriefing</i> de session de simulation.	36
3.2	Un extrait de graphe post-traitement automatique sur la granularité des événements présentés	38
3.3	La portion de graphe narratif relatif à l'unité 224	40
3.4	Le graphe narratif complet pour le scénario réaliste le plus simple, Egypt (pas encore auto-porteur!)	41

Chapitre 1

Introduction

1.1 Parti pris

J'écris ce mémoire 17 ans après mon mémoire de thèse. Il m'a donc fallu sélectionner les projets que j'allais raconter plus en détail et ceux qui ne seraient pas ou seraient peu évoqués.

J'ai choisi de me focaliser sur ce qui dans mes travaux de recherche pouvait avoir trait à la façon dont on raconte des histoires. En effet, même si ce sera sans doute moins vrai à l'avenir, cela a constitué mon sujet d'étude principal durant ces années. Cela m'a permis également, j'espère, de clarifier comment, à partir de ma formation initiale de logicienne, j'en suis arrivée à envisager des projets qui concernent les effets des systèmes sur leurs utilisateurs et utilisatrices.

1.2 Organisation du mémoire

Dans le chapitre 2, je détaille mes contributions aux modèles computationnels de la narration à l'aide de la logique linéaire. Nous avons proposé une formalisation possible des principaux concepts en narration interactive à l'aide de la logique linéaire. Nous pouvons ainsi faire le lien entre une description fine des actions narratives possibles, à partir de relations élémentaires de consommation des ressources et des concepts de plus haut niveau, indispensables pour pouvoir exprimer ou discuter des propriétés d'une spécification narrative, comme la variabilité des récits possibles, de la générativité d'un grand nombre de récits, et d'une direction narrative donnée.

J'ai poursuivi cet axe de recherche avec des collaborateurs dans deux directions principales. Dans une première approche, nous avons posé les jalons pour l'étude des univers narratifs interactifs à l'aide d'un assistant de preuve avec une bibliothèque spécialement conçue par mes collaborateurs. Nous avons montré comment établir des propriétés sur l'ensemble des preuves possibles d'un séquent, et donc, par exemple, des propriétés structurelles traversant tous les récits interactifs possibles engendrés par une spécification narrative sous forme de séquent.

J'ai également contribué à montrer comment mettre à profit un langage de programmation fondé sur la logique linéaire pour réaliser des moteurs de génération narrative.

Tous ces travaux se sont déroulés lorsque j'étais en poste au sein du laboratoire *Intelligent Virtual Environment* à l'université de Teesside.

Dans le chapitre 3, je détaille les travaux que j'ai menés depuis ma prise de fonction à l'ENIB. Ces

travaux, souvent construits à partir des résultats de ceux décrits au chapitre précédent sont plus en lien avec des applications, et l'on y voit l'amorce d'un virage thématique, avec plus d'importance donnée à la place des utilisateurs et utilisatrices dans la conception des systèmes. J'ai également eu plus de responsabilités d'encadrements et de pilotage de projets contractuels. Je décris un projet de recherche collaborative avec une société dans le cadre de la formation par la simulation (ANR ASTRID Maturation STRATEGIC, 2017 à 2021), autour de la *mise en histoire* des traces post-simulations pour préparer le *debriefing*. Je décris également des travaux réalisés avec des étudiantes et étudiants que j'encadre ou ai encadrés, dans un projet sur le pilotage d'*escape game*, une thèse qui concerne l'évaluation de la crédibilité de personnages virtuels au sein de jeux-vidéo, et une autre autour de la génération de comportement d'un ensemble de personnages virtuels pour provoquer un ressenti particulier (appliqué à la génération d'une audience virtuelle).

Enfin, dans le chapitre 4, je décris les projets que je souhaite mener dans les prochaines années. Je souhaite m'intéresser aux problèmes soulevés par l'intégration de récits au sein de dispositifs immersifs variés : l'interaction incarnée est un paradigme qui suppose une agentivité des utilisateurs et utilisatrices des systèmes, ce qui peut être en conflit avec le fait de suivre le récit. Je donne deux exemples de problèmes que je désire aborder avec mes collaboratrices et collaborateurs avec des pistes pour leur traitement, dans la continuité de mes travaux sur le pilotage de jeux-vidéos, et de l'utilisation des personnages virtuels. Je souhaite également m'intéresser aux façons de raconter une histoire donnée afin de remplir des objectifs communicationnels précis, notamment en suivant certains verrous identifiés suite au projet STRATEGIC. Enfin, je souhaite continuer à contribuer au domaine des agents virtuels, mais sous l'angle de la communication verbale, au travers de la génération de dialogue et de l'utilisation de l'humour. Je décris quelques explorations en ce sens effectuées avec mes collaboratrices et collaborateurs. Je conclus cette partie et le mémoire sur les usages que je souhaite faciliter par mes travaux.

Chapitre 2

Narration Computationnelle et Logique Linéaire

Dans ce chapitre, je détaille mes principales contributions sur la formalisation des récits et récits interactifs. Ces travaux ont eu lieu principalement de 2009 à 2014 et ont par la suite suscité des applications concrètes. Je commence par décrire la pertinence d’une approche fondée sur la Logique Linéaire (LL) pour la modélisation et le traitement de la narration computationnelle. Je présente les travaux que j’ai menés sur la preuve de propriété des récits modélisés dans un fragment de cette logique. Enfin, je montre comment mettre à profit un langage de programmation fondés sur la logique linéaire pour la génération narrative.

Je reviens en détail sur ces travaux dans ce chapitre.

2.1 La Logique Linéaire pour représenter les histoires interactives

2.1.1 Sérendipité

La narration a depuis longtemps sa place en IA (voir par exemple [114]), et a fourni la toile de fond pour plusieurs contributions à la représentation des connaissances, comme la définition de la structure d’événements [93]. Depuis une vingtaine d’années, il y a également un intérêt soutenu de la part des chercheurs en IA dans le domaine de la narration interactive ou de la génération narrative (voir [55] pour une revue récente). Le but à long terme de la narration interactive est de créer des récits qui peuvent être modifiés en temps-réel, s’adaptant aux réactions des utilisateurs et utilisatrices du système. Un système de narration interactive typique utilise un composant de planification [138] pour générer dynamiquement une séquence d’actions, qui constituera le squelette du récit. Celle-ci pourra ensuite être vue et animée grâce, par exemple, à des technologies pour le jeu-vidéo.

Afin d’explorer dans quelle mesure nous pouvions nous libérer des approches empiriques, pour développer des fondements théoriques solides pour cette discipline, nous nous sommes penchés sur la formalisation de la narration interactive : les *formalismes* développés en Narratologie sont plus proches d’ontologies et sont souvent difficilement généralisables. Ils posent un défi à leur mise en œuvre au sein de systèmes informatiques [27].

Parmi les propriétés fondamentales de la narration figurent en premier lieu des notions structurelles comme la causalité, le temps, et le raisonnement autour de l’action et du changement. Ces concepts ont

entraîné une somme de recherche non négligeable en Représentation des Connaissances, par exemple avec des logiques non-standard [69, 130]. Nous avons décidé d'étudier l'utilisation de la Logique Linéaire, en raison de son expression fine de la causalité [58, 59]. La gestion explicite des ressources en Logique Linéaire permet aussi de représenter de manière unifiée des mécanismes narratifs clé : beaucoup de travaux en narratologie (par exemple [64]) ont placé la sémantique des actions au centre de la description narrative. De plus, bien que le *temps continu* ne se représente pas très naturellement en LL, le concept plus discret de *temps narratif*, qui correspond à l'occurrence d'actions narratives, se représente naturellement.

Nous avons alors montré comment, en modélisant des actions narratives avec LL, il était possible de représenter les propriétés fondamentales de la narration sur des bases uniquement structurelles, sans avoir à nous reposer sur des ontologies ad hoc. Nous avons également posé les bases de l'étude de problèmes classiques en narration interactive avec les mécanismes de déduction en LL, comme la génération de variantes narratives.

2.1.2 Modélisation de récits non-linéaires

Travaux liés

Approches logiques de la narration interactive Avant nous, Grasbon et Braun [62] ont utilisé la programmation logique pour écrire un système de génération narrative. Cependant, leur système reposait sur une ontologie inspirée des travaux de Vladimir Propp sur la structure des contes russes [111]. La programmation logique a également été utilisée dans [122] pour la génération d'histoires logiquement cohérentes. Cette approche fondée sur les personnages s'appuie sur des modèles d'argumentation développés pour les systèmes d'agents autonomes pour résoudre les conflits vécus par les protagonistes. Notre approche plus générique s'appuie uniquement sur la description des récits sur les fondements structurels que sont la représentation de l'action et la compétition pour les ressources. Une grammaire formelle pour la description des récits a été proposée par [77], permettant la mise en œuvre d'un système générant des récits linéaires et reposant sur la logique temporelle. Bien que ces récits générés ne permettent pas le déroulement dans un monde ouvert ou de considérer le point de vue de plus d'un protagoniste, nos travaux partagent l'importance donnée à la description de la causalité narrative qui est ici intégrée au cœur du formalisme.

L'usage le plus similaire de la logique linéaire a été décrit dans [32] : un sous-ensemble de la logique linéaire était alors utilisé pour valider certaines propriétés de jeux-vidéos en passant par une transformation en réseau de Petri (par exemple, lister les états accessibles et les impasses).

Les liens entre la Planification et la Logique Linéaire A l'époque de notre proposition, la plupart des systèmes de Narration Interactive reposaient sur une forme de planification, le plus souvent en modélisant directement les principales actions narratives avec des opérateurs de planification. Un des arguments qui nous ont semblé plaider en la faveur de l'utilisation de la Logique Linéaire pour la narration interactive est l'existence de travaux établissant des liens forts entre cette logique et la planification, et en particulier la correspondance qui peut être faite entre une preuve en Logique Linéaire et un Plan [88, 87]. D'ailleurs cette propriété avait déjà été utilisée par [38] dans le cadre de la génération de dialogue.

Représenter des histoires avec un séquent

Nous avons donc proposé de spécifier des histoires avec un séquent écrit en logique Linéaire Intuitionniste (ILL). ILL est un fragment de LL, qui peut se représenter en calcul des séquents en limitant la partie droite de chaque séquent à une seule formule. Ce fragment est particulièrement adapté à une interprétation

$$\begin{array}{c}
\frac{}{A \vdash A} \text{ ax} \qquad \frac{\Delta, A \vdash C \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma, \Delta \vdash C} \text{ cut} \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A \quad \Delta \vdash B}{\Gamma, \Delta \vdash A \otimes B} \otimes R \qquad \frac{\Gamma, A, B \vdash C}{\Gamma, A \otimes B \vdash C} \otimes L \qquad \frac{}{\vdash 1} 1R \qquad \frac{\Gamma \vdash C}{\Gamma, 1 \vdash C} 1L \\
\\
\frac{\Gamma, A \vdash B}{\Gamma \vdash A \multimap B} \multimap R \qquad \frac{\Delta, B \vdash C \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma, \Delta, A \multimap B \vdash C} \multimap L \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \& B} \&R \qquad \frac{\Gamma, A \vdash C}{\Gamma, A \& B \vdash C} \&L_1 \qquad \frac{\Gamma, B \vdash C}{\Gamma, A \& B \vdash C} \&L_2 \qquad \frac{}{\Gamma \vdash \top} \top \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash A \oplus B} \oplus R_1 \qquad \frac{\Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \oplus B} \oplus R_2 \qquad \frac{\Gamma, A \vdash C \quad \Gamma, B \vdash C}{\Gamma, A \oplus B \vdash C} \oplus L \qquad \frac{}{\Gamma, 0 \vdash C} 0L \\
\\
\frac{!\Gamma \vdash A}{!\Gamma \vdash !A} !R \qquad \frac{\Gamma, A \vdash C}{\Gamma, !A \vdash C} !dL \qquad \frac{\Gamma, !A, !A \vdash C}{\Gamma, !A \vdash C} !cL \qquad \frac{\Gamma \vdash C}{\Gamma, !A \vdash C} !wL
\end{array}$$

FIGURE 2.1 – Le calcul des séquents en Logique Linéaire Intuitionniste

de la logique linéaire basée sur les ressources et exprimant la causalité [58]. La figure 2.1 rappelle le calcul des séquents d'ILL.

Dans la partie gauche du séquent, nous décrivons toutes les conditions initiales de l'environnement narratif. Celles-ci sont donc représentées comme des ressources qui peuvent être utilisées pendant le déroulement du récit. Parmi ces ressources, il y a les actions narratives, mais également par exemple, des représentations des personnages et de leurs états mentaux. La formule à droite du séquent représente l'état narratif à la fin du récit, lorsque toutes ces ressources auront été consommées.

Ainsi, on peut exprimer par une spécification en un séquent d'ILL :

- la génération d'une variété de récits *différents* établis à partir des mêmes éléments (le caractère génératif de la spécification)
- l'impact d'un *monde ouvert* où se déroulerait le récit (la variabilité des récits générés)
- le caractère forcé, impératif, de certaines actions narratives lors du récit (le pilotage des récits).

Une preuve d'un tel séquent représente un récit particulier (possiblement interactif).

Une fois équipés de ces notions, nous disposons d'un outil conceptuel pour exprimer et étudier les plus importantes caractéristiques des récits interactifs.

Un exemple : Madame Bovary

Nous avons choisi le roman de Flaubert *Madame Bovary* [48] pour illustrer nos travaux. En effet une des difficultés majeure lorsque l'on veut dériver des représentations formelles, voire computationnelles, de contenu littéraire, est celui de l'interprétation. Dans le cas de ce roman, une publication de 1995 organisant et transcrivant les notes et travaux préparatoires de Flaubert [49] nous a permis de minimiser cet écueil. Nous avons ainsi pu restituer avec plus de fidélité la structure du récit. Aujourd'hui, on peut consulter ce matériel

en ligne sur le site du Centre Flaubert de l'université de Rouen ¹, pour lequel nous avons été invités à fournir une version vulgarisée des travaux présentés dans ce chapitre en 2014 ².

Il peut sembler inconfortable de travailler sur un roman ayant eu un si profond impact. Cependant Flaubert a lui-même pu exprimer l'importance de la compréhension de relations causales dans la structure des récits et cela nous a semblé faire écho à notre projet : insatisfait à propos de son propre roman *L'éducation sentimentale*, il a écrit dans une lettre à Louise Collet le 16 Janvier 1852 ³ :

En résumé, il faudrait pour l'Éducation récrire ou du moins recaler l'ensemble, refaire deux ou trois chapitres et, ce qui me paraît le plus difficile de tout, écrire un chapitre qui manque, où l'on montrerait comment fatalement le même tronc a dû se bifurquer, c'est-à-dire pourquoi telle action a amené ce résultat dans ce personnage plutôt que telle autre. Les causes sont montrées, les résultats aussi ; mais l'enchaînement de la cause à l'effet ne l'est point. Voilà le vice du livre, et comment il ment à son titre.

Enfin, comme un clin d'œil, l'existence d'un texte de Jean-Yves Girard (à l'origine de la Logique Linéaire) décrivant un dialogue imaginaire avec M. Homais (personnage du roman *Madame Bovary*) a scellé notre choix.

Nous détaillons notre proposition autour de deux fragments du roman pour illustrer notre démarche.

Dans le texte ci-dessous, états et ressources de l'environnement narratif (D, P, R et S) et actions narratives sont identifiés et l'étude du roman et des notes accompagnantes permet également d'identifier des moments-clés à partir desquels nous avons pu construire des déroulements alternatifs du récit :

Fragment 1 :

Emma a épuisé tous les recours possibles pour déferer le paiement de ses dettes (D) et subit une humiliation publique à ce sujet. Elle a précédemment appris où le pharmacien cache l'arsenic (P). Elle a une dernière idée, désespérée [**moment-clé**] : elle supplie son ancien amant Rodolphe (R) de l'aider. Cependant, Rodolphe est réticent à l'idée de se lier à elle de nouveau [**moment-clé**]. Quand Emma quitte Rodolphe, elle décide de voler le poison et de commettre un suicide (S).

Nous modélisons un second fragment à partir du roman et des plans de Flaubert ([49] plans 55 et 57). Dans ce fragment nous avons utilisé un événement présenté alors comme une possibilité rétrospective, une conversation avec le notaire. Celle-ci permet d'imaginer un déroulement de l'histoire différent de celui du roman à partir des seules actions qui y sont évoquées.

Fragment 2 :

Les dettes d'Emma Bovary augmentent (D_i), mais Lheureux est toujours disposé à lui prêter de l'argent (L). Le couple Bovary a récemment hérité de terres (H). Emma vend cet héritage en passant par l'intermédiaire de Lheureux. Elle continue à augmenter ses dettes (D_i), jusqu'à ce que Lheureux refuse de lui prêter plus d'argent (D). Alors qu'elle n'a plus aucune ressource, elle a une brève discussion au sujet de sa situation financière avec Félicité (F), lors de laquelle elle apprend que Guillaumin, le notaire, pourrait être en position de l'aider (G). A la suite de quoi, Emma a une discussion avec Guillaumin qui se termine sur un désaccord, mais durant laquelle il mentionne que si seulement elle était venue plus tôt, il aurait pu l'aider à faire des investissements plus profitables (M) [**moment-clé**].

1. Centre Flaubert, université de Rouen <https://flaubert.univ-rouen.fr/> Consulté le 16 Février 2022

2. Madame Bovary en Logique Linéaire, étude de Anne-Gwenn Bossier et Marc Cavazza, <https://flaubert-v1.univ-rouen.fr/article.php?id=35> Consulté le 16 Février 2022

3. On peut trouver cette lettre en ligne sur le site du Centre Flaubert de Rouen <https://flaubert-v1.univ-rouen.fr/correspondance/conard/lettres/52a.html>

2.1.3 Une preuve est une histoire

Nous proposons maintenant une interprétation narrative des connecteurs d'ILL, afin d'expliquer comment on peut s'en servir pour caractériser finement des environnements narratifs et déduire des récits. Nous allons illustrer cette approche en modélisant les deux fragments décrits précédemment.

Les séquents que nous utilisons sont de la forme $\Gamma \vdash A$, où A est une formule simple et Γ un multiset. Nous sommes intéressés par les preuves sans coupures (sans utilisation de la règle cut), car nous voulons une trace de l'exécution des actions narratives et cette règle pourrait masquer l'utilisation des actions correspondantes.

Interprétation narrative des connecteurs, ressources, implications linéaires Tout d'abord, nous remarquons que les connecteurs de la Logique Linéaire se prêtent naturellement à la modélisation des concepts narratifs que nous avons identifiés plus haut.

Par exemple, nous utiliserons la conjonction multiplicative (\otimes) pour exprimer des pre et post-conditions complexes des actions narratives. La sous-formule $S \otimes D$ du côté droit du séquent de la figure 2.2 signifient que les ressources S et D sont toutes les deux disponibles après le déroulement d'une branche narrative donnée. Cette formule exprime la dette d'Emma, et le fait qu'elle soit décédée.

Pour des récits prenant place dans des mondes ouverts, comme c'est le cas pour la narration interactive, nous devons pouvoir décrire la variabilité de l'histoire en fonction de facteurs externes. Nous utiliserons alors le connecteur (\oplus) pour encoder un choix explicite à l'origine d'une fourche dans le récit, ainsi que le connecteur $\&$, qui pourra de manière duale modéliser l'adaptation du récit au chemin narratif suivi.

Ce même connecteur (\oplus), utilisé dans une formule du côté droit du séquent, pourra permettre de modéliser différentes fins possibles du récit. Par exemple, la formule $(S \otimes D) \oplus D$ sur la partie droite du séquent présenté figure 2.2 exprime la possibilité de deux fins possibles du récit selon l'impact des événements externes. L'une est représentée par la sous-formule $S \otimes D$ et signifie qu'Emma est décédée et que sa dette demeure, l'autre, représentée par D qu'Emma est simplement endettée.

Une des principales motivations dans notre travail est de capturer la causalité narrative, et cela passe par une modélisation fine des actions. Un modèle des actions narratives doit être capable de prendre en compte ses relations au contexte et l'impact de l'exécution de ces actions. C'est précisément la nature de l'implication linéaire (\multimap) qui correspond à un paradigme de causalité de type *action/réaction* [59]. Dans le modèle que nous proposons, l'application de la règle ($\multimap L$) du calcul des séquents de la logique linéaire dans une preuve correspond à l'exécution d'une action narrative et représente de manière précise son impact sur le contexte narratif. Par exemple, considérons cette formule définie dans la figure 2.4 :

$$(L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D))$$

Cette formule représente une action narrative modélisée comme requérant et préservant la ressource L , consommant les ressources D_2 et H et produisant les ressources D_0 et $(L \otimes D_2) \multimap D$, cette dernière représentant également une action narrative. Elle signifie que la vente du terrain hérité par les Bovary (H) à Lheureux (L) permet d'éponger une dette importante (D_2 sera remplacé par D_0), mais que la prochaine fois que ce niveau de dette sera atteint, cela signifiera la banqueroute (D). Si le séquent dans lequel est présente cette formule permet l'application de la règle ($\multimap L$), c'est-à-dire contient les ressources L , D_2 et H , alors cette application et les transformations correspondantes du séquent correspondent à l'exécution de l'action narrative et à la transformation de l'environnement narratif qui en résulte. l'action narrative peut être exécutée en transformant l'environnement narratif, faisant progresser le récit. Ici, l'action narrative représente la vente des terrains hérités, qui fait descendre le niveau de dette d'Emma, et introduit une nouvelle action narrative, qui correspondra à un emprunt d'Emma faisant atteindre le plafond d'endettement jugé acceptable

par Lheureux. Accessoirement, on voit ainsi une des manières dont on peut piloter le déroulement narratif en imposant que certaines actions ne soient possibles qu'une fois d'autres effectuées.

Nous aurons régulièrement besoin de représenter des événements moins « clé » du récit, des actions banales, pouvant se dérouler fréquemment, ou peut-être même facultatives : pensez, par exemple, à un récit interactif se déroulant dans l'environnement ouvert d'un jeu vidéo. Dans ce genre de cas, nous pourrions utiliser l'opérateur (!). C'est cet opérateur qui permet de contrôler précisément la contraction et l'affaiblissement en Logique Linéaire (à la différence de la logique classique, ce sont ici les règles seules de son calcul des séquents qui les établissent).

Par exemple, la formule $!(H \multimap (H \otimes M))$ utilisée dans la section 2.1.4 représente une action narrative $H \multimap (H \otimes M)$ évoquée mais ne se produisant pas dans le récit originel (la possibilité pour les Bovary de faire fructifier leur héritage). Elle pourra figurer plusieurs fois dans des récits alternatifs, représentés par les preuves des figures 2.5 et 2.6. Le même séquent à la racine de ces preuves peut en fournir une autre ne décomposant pas cette formule (figures 2.4 et 2.7), correspondant au récit originel qui évoque, mais ne matérialise pas cet événement.

Représentation des propriétés Narratives

Nous allons maintenant décrire comment les concepts fondamentaux pour les récits non linéaires peuvent naturellement être exprimées en LL, ainsi que la manière dont un séquent permet de synthétiser les propriétés dynamiques du récit interactif ainsi formalisé.

Contrôle Narratif Le contrôle narratif suppose que nous soyons capables de nous assurer du déroulement de certaines actions narratives spécifiques, de pouvoir forcer de la précédence d'actions narratives, ou de pouvoir conduire le récit vers une fin donnée.

Ce contrôle est ici intimement mêlé à la nature même du calcul des séquents en ILL. Au lieu de se focaliser sur la validité d'une formule dans un contexte donné comme en logique classique, une preuve sans coupure dans le calcul des séquents en ILL décrit comment la consommation des ressources à gauche du séquent mène à la formule à droite du séquent. Le déroulement de la preuve correspond alors au déroulement du récit.

Par exemple, comme nous l'avons déjà évoqué, en définissant la formule $(S \otimes D) \oplus D$, qui apparaît à la droite du séquent décrit dans la figure 2.2, on peut contraindre deux fins possibles pour l'histoire : l'une est caractérisée par les ressources S and D (Emma est morte et ruinée) et l'autre par D (Emma est seulement ruinée).

La sensibilité aux ressources du calcul des séquents ILL, se manifeste notamment ainsi : lors d'une preuve sans coupures, une formule du contexte (à gauche du séquent) sera soit décomposée par une règle correspondant à son connecteur principal, soit éliminée par une feuille de l'arbre de preuve (avec une sous-formule correspondante de la formule à droite, grâce aux règles 0 ou \top). Pour s'assurer du déclenchement d'une action narrative, il suffit donc de s'assurer que la formule correspondante fait partie du contexte et ne peut pas être éliminée sur une feuille de l'arbre de preuve,

Le séquent qui génère les preuves au sein des Figures 2.5 et 2.4 fournit un exemple où l'action narrative modélisée par $F \multimap G$ a ce caractère obligatoire. Elle fait partie du contexte et sera exécutée quelle que soit la variante narrative. De plus, cet exemple montre comment l'exécution d'une action obligatoire (la formule 5 dans la section 2.1.4) ajoute elle-même au contexte une formule représentant une autre action narrative obligatoire, créant ainsi une chaîne causale. Nous pouvons également bien sûr expliciter cette chaîne causale, en simplifiant le langage utilisé pour écrire les formules : on pourra alors introduire une ressource tampon,

qui représentera un état *narratif* atteint par le déclenchement de la première action et pourra être consommée par la seconde action.

Generativité Un récit est caractérisé par un ensemble ordonné d’actions narratives qui permettent d’accéder à un état final. La génération de variantes dans cet ordre et dans les actions qui se produisent fournit des mécanismes pour créer des récits non-linéaires. Justement, un séquent est « génératif » par nature, car il comprend la possibilité de toutes ses preuves. Cela nous fournit donc un moyen simple de générer différents récits interactifs à partir d’une seule spécification.

L’exemple que nous fournissons dans la section 2.1.4 , et en particulier les preuves décrites dans les figures 2.5 et 2.4 illustrent comment, à partir de la même description, différents récits peuvent être générés. Ces récits ne diffèrent pas seulement par l’ordre dans lequel les actions y seront exécutées en suivant l’ordre d’application des règles lors de la recherche de preuve, mais par les actions qui s’y produisent ou leurs liens de causalité, ce qui caractérise d’authentiques différences et pas une simple réorganisation du discours.

Variabilité de la Narration Les récits interactifs prennent souvent place dans des environnements dynamiques. De tels récits proposent en général une structure avec des branchements (souvent implicites, c’est-à-dire qu’à la différence des récits hypertexte, on le constatera a posteriori) : différents déroulements peuvent donc émerger à partir de l’influence de facteurs externes sur le déclenchement des actions narratives.

Cette variabilité narrative peut être exprimée comme partie intégrante de la description des conditions initiales d’un séquent grâce à (\oplus) . Le séquent modélisé dans la Figure 2.2 illustre un tel choix, fait à l’extérieur du récit entre deux actions narratives :

$$(P \multimap S) \oplus (R \multimap \textit{formula})$$

Cela nous mène à deux récits possibles, représentés par des branches différentes de l’arbre de preuve. Pour qu’une action soit exécutée, nous devons disposer de ressources qui correspondent à des ‘pré-conditions’ (ici P ou R) depuis le contexte, ainsi que de pouvoir éliminer les ressources seulement consommées par la branche correspondant au récit alternatif. Une manière simple de modéliser cela est d’utiliser l’opérateur $\&$ et d’ajouter la formule $P \& R$ au contexte. Selon la branche de la preuve que l’on considère, la ressource adéquate sera consommée (l’exemple décrit section 2.1.3 est un peu différent, mais utilise ce principe avec les formules $P \& 1$ et $R \& 1$)

Calcul des séquents et représentation narrative

Nous décrivons maintenant comment modéliser un fragment narratif grâce à un séquent ILL, avant d’expliquer la traduction de la preuve de ce séquent en récit.

Intéressons-nous tout d’abord au Fragment 1, section 2.1.2. Nous y avons identifié deux actions narratives correspondant à des moments-pivots : Emma discute de sa situation avec Rodolphe puis Emma ingère du poison. Pour chaque moment-pivot identifié, nous introduisons un élément de *variabilité*, représentant l’impact possible d’événements externes, dans une hypothèse de monde ouvert. Tout d’abord, Emma peut décider de ne pas aller supplier Rodolphe de l’aider. Ensuite, Rodolphe peut convaincre Emma que la ruine et l’humiliation ne sont pas des raisons de se donner la mort. Cela crée deux autres récits possibles pour ce fragment : Emma se donne la mort à cause de ses dettes, ou continue à vivre malgré elles.

Les modèles LL de ce fragment, ressources, actions, ainsi que le séquent et sa preuve sont représentés figure 2.2

En accord avec les principes décrits plus haut, chaque action peut utiliser (\multimap) et (\otimes) (pour pré et post-conditions), chaque choix externe entre deux actions utilise (\oplus) . La description des ressources est systématiquement adaptée aux pré-conditions et choix des actions avec l’opérateur dual $(\&)$.

Le séquent que nous obtenons, à la racine de l'arbre de preuve présenté figure 2.2, représente trois déroulements possibles du récit. L'un d'entre eux correspond au roman, et tous les trois sont directement obtenus à partir de la formalisation des dépendances au sein des actions et de l'environnement narratif. En suivant les applications successives de la règle $(\multimap L)$, qui correspond à l'exécution des actions narratives, de bas en haut, on peut reconstruire ces récits. Ils correspondent à des chemins différents dans l'arbre de preuve, avec un branchement à chaque choix explicite représenté par un $(\oplus L)$. À l'époque de la publication de ce travail, nous avons obtenu cette preuve très rapidement avec le *llprover* de [129].

2.1.4 La fin d'Emma Bovary

Nous décrivons maintenant un exemple plus substantiel, représentant une séquence narrative de *Madame Bovary* établie à partir du Fragment 2 présenté dans la section 2.1.2.

Nous définissons les ressources suivantes :

D	Emma atteint un niveau de dette impossible à rembourser
D_i	Des niveaux de dette croissants i
H	L'héritage en terrains du beau-père d'Emma Bovary
F	Félicité est disponible pour une discussion avec Emma
G	Le notaire Guillaumin est disponible pour une discussion avec Emma
M	De l'argent disponible pour Emma
L	Lheureux est disposé à prêter de l'argent à Emma

Le séquent que nous proposons utilise les formules suivantes, modélisées systématiquement de la même manière que dans la section précédente 2.1.3 :

1. $F \multimap G$: discussion entre Emma et Félicité.
2. $G \multimap !(H \multimap H \otimes M)$: rencontre entre Emma et Guillaumin, durant laquelle Emma apprend que l'héritage peut s'investir pour générer des profits.
3. $!((L \otimes D_i) \multimap (L \otimes D_{i+1}))$, $i = 0, 1$: Emma augmente sa dette.
4. $!((D_{i+1} \otimes M) \multimap D_i)$, $i = 0, 1$: Emma rembourse une partie de sa dette.
5. $(L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D))$: Emma vend l'héritage et rembourse sa dette. Cette action en produit une autre, ajoutée à l'environnement. Si Emma est de nouveau endettée à ce niveau et que Lheureux lui prête de nouveau de l'argent, ce sera la dernière fois qu'il sera disposé à le faire.

Nous définissons les multiset \mathcal{L} , \mathcal{M} et \mathcal{R} dans la Figure 2.3. L'environnement narratif est désormais encodé par le séquent :

$$\mathcal{R}, F \multimap G, (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D$$

Dans ce séquent, nous avons explicitement encodé des relations causales atomiques, grâce à l'opérateur (\multimap) pour introduire de nouvelles actions dans l'environnement, ou grâce à des formules-ressources qui servent à représenter des états pré et post-déclenchement d'actions. Les actions narratives représentées par les formules 1, 2, et 5 se produiront nécessairement dans tous les récits, dirigeant ceux-ci vers le résultat contraint D.

D	Emma atteint un niveau de dette impossible à rembourser
D _i	Des niveaux de dette croissants <i>i</i>
H	L'héritage en terrains du beau-père d'Emma Bovary
F	Félicité est disponible pour une discussion avec Emma
G	Le notaire Guillaumin est disponible pour une discussion avec Emma
M	De l'argent disponible pour Emma
L	Lheureux est disposé à prêter de l'argent à Emma

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= !((L \otimes D_0) \multimap (L \otimes D_1)), !((L \otimes D_1) \multimap (L \otimes D_2)) \\ \mathcal{M} &= !((D_1 \otimes M) \multimap D_0), !((D_2 \otimes M) \multimap D_1) \\ \mathcal{R} &= H, F, L, D_2, G \multimap !(H \multimap (H \otimes M))\end{aligned}$$

FIGURE 2.3 – Définition des multisets de ressources

$$\begin{array}{c} \text{Suite de la preuve Figure 2.7} \\ \hline \frac{F, L, D_0, F \multimap G, G \multimap !(H \multimap H \otimes M), (L \otimes D_2) \multimap D, \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}}{L, D_2, H \vdash L \otimes D_2 \otimes H \quad F, F \multimap G, G \multimap !(H \multimap H \otimes M), L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}} (\otimes L(2)) \\ \hline \frac{H, F, L, D_2, G \multimap !(H \multimap (H \otimes M)), F \multimap G, (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}}{\mathcal{R}, F \multimap G, (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}} (\multimap L)\end{array}$$

FIGURE 2.4 – Fragment originel du roman de Flaubert – Partie 1. Emma vend l'héritage Bovary par l'intermédiaire de Lheureux.

$$\begin{array}{c} \text{Suite de la preuve Figure 2.6} \\ \hline \frac{F \vdash F \quad H, L, D_2, G, G \multimap !(H \multimap (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}}{H, F, L, D_2, F \multimap G, G \multimap !(H \multimap (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}} (\multimap L) \\ \hline \mathcal{R}, F \multimap G, (L \otimes D_2 \otimes H) \multimap (L \otimes D_0 \otimes ((L \otimes D_2) \multimap D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash \bar{D}\end{array}$$

FIGURE 2.5 – Fragment alternatif – Partie 1. La discussion avec Félicité lors de laquelle Emma apprend que Guillaumin pourrait l'aider se déroule plus tôt.

$$\begin{array}{c}
\frac{L, D_2 \vdash L \otimes D_2 \quad D \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{L, D_2, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D \vdash D} \quad (\otimes L) \\
\frac{L \otimes D_2, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D \vdash D}{\dots} \quad (\otimes L) \\
\frac{L, D_2, H \vdash L \otimes D_2 \otimes H \quad L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{L} \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{H, L, D_2, (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L} \vdash D} \quad (\text{--} \circ L) \\
\frac{\dots}{\dots} \\
\frac{M, D_2 \vdash M \otimes D_2 \quad H, L, D_1, !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{H, L, M, D_2, !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\text{--} \circ L) \\
\frac{H \otimes M, L, D_2, !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, !(D_1 \otimes M) \text{--} \circ D_1, I \vdash D \quad (!CD)}{H \vdash H \quad \frac{H \otimes M, L, D_2, !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{H \text{--} \circ (H \otimes M), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D} \quad (!CD)} \quad (\otimes L) \\
\frac{H, L, D_2, H \text{--} \circ (H \otimes M), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (!CD)}{G \vdash G \quad \frac{H, L, D_2, !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (!CD)}{H, L, D_2, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\text{--} \circ L)}
\end{array}$$

FIGURE 2.6 – Fragment alternatif – Partie 2. Correctement investie avec l’aide de Guillaume, l’héritage Bovary fournit un revenu temporaire, qui délaie les dettes d’Emma

$$\begin{array}{c}
\frac{G \vdash G \quad (H \text{--} \circ (H \otimes M)), D, !(D_1 \otimes M) \text{--} \circ D_0, I \vdash D \quad (!W(3))}{F \vdash F \quad G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), D, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\text{--} \circ L) \\
\frac{L, D_2 \vdash L \otimes D_2 \quad F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), D, \mathcal{M} \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), L, D_2, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\otimes L) \\
\frac{L, D_1 \vdash L \otimes D_1 \quad F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), L, D_2, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D \quad (\text{--} \circ L)}{F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), L, D_1, L \otimes D_1 \text{--} \circ L \otimes D_2, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D} \quad (!D) \\
\frac{F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), L, D_1, !(L \otimes D_1) \text{--} \circ (L \otimes D_2), (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D \quad (\otimes L)}{L, D_0 \vdash L \otimes D_0 \quad F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), L \otimes D_1, !(L \otimes D_1) \text{--} \circ (L \otimes D_2)), L, D_0, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\text{--} \circ L) \\
\frac{F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_0) \text{--} \circ (L \otimes D_2)), (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D \quad (!D)}{F, F \text{--} \circ G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), !(L \otimes D_0) \text{--} \circ (L \otimes D_2)), L, D_0, (L \otimes D_2) \text{--} \circ D, \mathcal{M} \vdash D} \quad (!D)}
\end{array}$$

FIGURE 2.7 – Fragment correspondant au roman original de Flaubert – Partie 2. Emma accroît ses dettes jusqu’à l’insolvabilité. La discussion entre Emma et Félicité se produit trop tard pour qu’Emma puisse investir l’héritage Bovary, une fois les terrains vendus.

$$\begin{array}{c}
\frac{H, L, D_2, G, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (\otimes L)}{H, L, D_2, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), G \otimes (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\otimes L(3)) \\
\frac{F \vdash F \quad \frac{H, L, D_2, G \text{--} \circ !(H \text{--} \circ (H \otimes M)), G \otimes (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (\otimes L)}{\mathcal{R}, F \text{--} \circ (G \otimes (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D)))}, \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D \quad (\oplus L)}{\mathcal{R}, (F \text{--} \circ (G \otimes (L \otimes D_2 \otimes H) \text{--} \circ (L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D))) \oplus ((L \otimes D_0 \otimes (L \otimes D_2) \text{--} \circ D) \otimes (F \text{--} \circ G)), \mathcal{L}, \mathcal{M} \vdash D} \quad (\oplus L)}
\end{array}$$

Continuer Figure 2.6

Continuer Figure 2.7

FIGURE 2.8 – Fragment Narratif avec un branchement. Dans une interprétation *monde ouvert*, un événement externe (par exemple, une interaction utilisateur) décide de l’ordre de deux actions narratives : elles correspondent respectivement à la discussion entre Emma et Félicité, et à la vente des terrains hérités.

Discussion Nous avons illustré que plusieurs preuves, et donc récits, pouvaient être générés à partir de ce séquent. Celui de la Figure 2.4 correspond au récit original, tandis que celui de la Figure 2.5 représente un récit alternatif, lors duquel Emma obtient un répit dans sa spirale d’endettement grâce à l’investissement de l’héritage Bovary par l’intermédiaire de Guillaumin.

Ces histoires diffèrent, au-delà d’un simple réordonnement des actions, dans leurs usages des ressources qui correspondent à l’environnement narratif : l’histoire alternative présente des actions qui ne se produisent pas dans le roman (mais correspondent bien à des alternatives découlant d’actions narratives *what if* qui y sont évoquées, des scénarios contrefactuels).

A partir de notre encodage des actions narratives en formules de la logique linéaire, nous pouvons finement décrire l’impact de chaque action narrative, et donc obtenir au sein de chaque preuve des chaînes d’actions narratives liées causalement. Un seul séquent permet d’exprimer toutes les chaînes causales à partir de la description individuelle des actions.

On peut aussi encoder dans le séquent des relations externes au récit initial. Un tel exemple est illustré Figure 2.8. Les formules 1 et 5 ont été remplacées par une formule plus complexe qui fournit un choix entre deux ordonnancements possibles d’actions narratives. Les relations de précédence sont codées en dur grâce à l’implication linéaire.

2.1.5 Perspectives de ces travaux

Nous pensons que ces travaux montrent que la logique linéaire fournit un cadre conceptuel parfaitement adapté à la représentation des actions narratives, qui permet un retour aux principes fondamentaux de leur représentation par rapport aux approches décrites dans [27]. ILL nous semble une forme de rasoir d’Occam pour représenter des propriétés fondamentales que les formalismes venant de l’IA ont eu des difficultés à traiter : cela permet de considérer des concepts liés à la narration non linéaire, comme la *générativité*, la *variabilité* et le *contrôle narratif* dans le cadre de son calcul des séquents.

Cependant, le calcul des séquents d’ILL est limité d’un point de vue purement computationnel : la prouvabilité des formules est indécidable, et la recherche de preuve est coûteuse. Une piste pour continuer ce travail, inspirée de [39], a émergé en collaboration avec Pierre Courtieux et Julien Forest : puisque la machine ne se débrouille pas bien seule, et que l’exemple de la figure 2.8 vous aura sans doute convaincu que l’humain non plus, pourquoi ne pas explorer l’usage d’un assistant de preuve comme Coq ? C’est la piste que nous avons explorée ensemble et que je décris dans la section 2.2.

Une autre piste est de restreindre le fragment à utiliser, en faisant des compromis au niveau de son expressivité. L’objectif ici est de restreindre le langage et de développer des tactiques de preuve dédiées, établies sur la manière dont les connecteurs et les règles sont utilisées dans le contexte de la modélisation narrative, afin d’identifier un fragment « génératif », proposant des propriétés computationnelles gérables tout en étant expressif. Marc Cavazza, Joao F. Ferreira et moi avons alors commencé l’exploration de cette piste, rejoints par Chris Martens. Ce sera le sujet de la section 2.3.

2.2 Prouver les propriétés des histoires interactives

Un des problèmes pratique rencontré par nombre d’auteurs et autrices en narration interactive est celui de la vérification de la cohérence des scénarios et de leur qualité au fur et à mesure de la croissance de leur complexité. Ainsi, Charlie Brooker et Annabel Jones ont pu confier leur difficulté à mettre au point le

scénario de l'épisode interactif *Bandersnatch* de la série *Black Mirror*⁴.

La lecture de la section précédente vous aura peut-être également convaincu que l'on ne peut pas raisonnablement attendre des auteurs et autrices qu'ils déroulent à la main toutes les preuves d'un séquent. Dans cette section, je décris les travaux autour de l'utilisation de Coq [35] pour construire interactivement les preuves d'un séquent en ILL spécifiant une histoire interactive, ainsi que des preuves de propriétés sur toutes les preuves possibles.

Nous proposons une méthode pour modéliser les ressources et actions d'un récit, en caractérisant un sous-ensemble d'ILL par rapport à nos travaux précédents. Nous décrivons comment des récits interactifs bien formés peuvent être interprétés à partir d'une preuve sans coupure d'un séquent spécifiant un environnement narratif. Enfin, nous avons décrit comment raisonner sur la structure des récits grâce à Coq : en permettant de prouver des propriétés du second ordre sur l'ensemble des preuves générées par un séquent, Coq permet d'aider à la vérification de propriétés structurelles traversant toutes les variantes possibles d'un récit spécifié par un séquent.

2.2.1 Travaux proches

Comme le fragment intuitionniste de la logique linéaire est indécidable, Dixon [39, 38] a utilisé également un assistant de preuve pour valider les plans de dialogues dans des systèmes multi-agent. Nous voulions aller au-delà et étudier et vérifier des propriétés au second ordre, transcendant toutes les histoires possibles. Si on considère le fragment entier de la Logique Linéaire, on se retrouve face à un obstacle conséquent pour l'automatisation ou la semi-automatisation de la recherche de preuve (une revue des propriétés de décidabilité et de complexité de différents fragments de la logique linéaire est disponible ici [80]). Le sous-ensemble que nous décrivons est restreint et nous a permis de faciliter certains développements. Notre approche est en cela similaire à certains travaux utilisant LL dans le domaine de la linguistique computationnelle : [65] caractérise des motifs d'utilisation de LL pour la construction de sens qui permettent d'avoir de meilleures propriétés computationnelles.

Des travaux antérieurs aux nôtres ont proposé des encodages de la logique linéaire pour des assistants de preuve. Par exemple, dans [109], les auteurs présentent un *shallow embedding* d'ILL dans Coq et exécutent des preuves par induction. Dans [74] une manière efficace et simple d'utiliser les règles d'ILL en Isabelle est présentée. Comme dans ces travaux précédents, nous avons fourni un certain niveau (limité) d'automatisation pour prouver des séquents, mais nous avons également proposé des lemmes et tactiques pour raisonner sur les propriétés des preuves, ainsi que sur toutes les preuves possibles d'un séquent.

Ainsi, ce sont les travaux de Dixon et al. [38] qui nous semblent les plus proches des nôtres. Les auteurs ont proposé une formalisation dans l'assistant de preuve Isabelle avec l'objectif de générer des plans vérifiés et donc de raisonner sur les plans eux-mêmes. Une différence notable, due à l'utilisation d'Isabelle, est que les plans apparaissent explicitement dans les jugements comme termes de preuve extraits. Nous n'avons pas besoin de cela car nos récits sont des termes de preuve ILL. La relation entre la forme de la preuve et le récit apparaît alors comme un exemple original et nouveau de l'utilisation du paradigme *proof as term*.

Sans refaire toutes les preuves, disponibles dans l'article [20] ainsi que dans les ressources associées, je récapitule ici les éléments de ce travail.

4. Article du journal Libération le 29 mars 2019, « Black Mirror » : « Au moment de la révélation, les gens ont halluciné », Marius Chapuis.

https://www.liberation.fr/images/2019/03/29/black-mirror-au-moment-de-la-revelation-les-gens-ont-hallucine_1718264/. Accédé en Juillet 2022.

Res	::=	1 atom Res & Res Res \otimes Res !Res
Act	::=	1 CRes \multimap Context Act \oplus Act Act & Act !Act
Goal	::=	1 atom Goal \otimes Goal Goal \oplus Goal Goal & Goal
CRes	::=	1 atom CRes \otimes CRes
Context	::=	Res Act Context \otimes Context

FIGURE 2.9 – Catégories syntaxiques pour la spécification narrative sous forme de séquent.

2.2.2 Une interprétation narrative d'un sous-ensemble d'ILL

Comme dans les travaux décrits à la section précédente, notre approche est fondée sur la spécification des ressources du récit (dont les actions narratives), les conditions initiales et les états finaux possibles sous la forme d'un séquent ILL.

Nous fournissons ensuite précisément la procédure d'interprétation d'une preuve d'un tel séquent en récit interactif se produisant dans un monde ouvert. Cette procédure repose sur les traces de l'utilisation de quelques règles du calcul des séquents qui sont particulièrement significatives dans notre interprétation : d'un point de vue narratif, nous identifions l'exécution des actions narratives, les choix externes dans une hypothèse monde ouvert (des interactions) provoquant des fourches dans le récit, ainsi que les relations de concurrence entre différents sous-ensembles indépendants du récit.

Méthode de codage d'un récit en ILL

La figure 2.9 décrit le fragment de langage que nous avons défini pour les formules des séquents qui permettent de spécifier les récits interactifs.

Comme dans la section 2.1, les actions narratives sont modélisées grâce à \multimap , ce qui permet de décrire précisément leur impact sur leur environnement. Le connecteur \oplus décrira des choix possibles entre les actions narratives et $\&$ un choix possible entre deux états finaux. Ce fragment constitue une restriction par rapport à celui considéré précédemment, notamment au niveau du codage des actions. Cette restriction nous a permis d'établir certains résultats au prix d'une concision dans l'encodage de relations de précédences des actions narratives.

La spécification de l'environnement narratif comprend également les ressources narratives et les états, ainsi que les états finaux possibles du récit. Le séquent initial sera donc de la forme :

$$\mathcal{R}, \mathcal{A} \vdash \text{Goal}$$

où \mathcal{R} est un multiset représentant les ressources et conditions initiales, \mathcal{A} un multiset représentant les actions narratives possibles, et *Goal* une formule représentant les états finaux possibles du récit. Un tel séquent fournit ainsi la représentation des connaissances nécessaires pour un ensemble de récits.

Comme précédemment, nous avons utilisé un extrait de *Madame Bovary* pour illustrer notre approche : face à une humiliation publique possible, Emma recherche l'aide d'autres protagonistes (Guillaumin, Binet et son ancien amant Rodolphe) avant de finalement ingérer le poison qu'elle a précédemment localisé. Nous identifions des ressources atomiques et des actions narratives se produisant dans le roman, puis des actions alternatives inspirées par les choix des personnages. Nous introduisons également la possibilité d'une autre fin possible, dans laquelle Emma survit.

Ressources du récit

Res spécifie les catégories syntaxiques pour \mathcal{R} . La formule $\text{Res}_1 \& \text{Res}_2$ exprime la disponibilité de l'une des ressources. Seule l'une des Res_i sera utilisée, et le choix dépendra de la preuve, et peut varier

selon la branche. Cela permet de décrire comment les conditions initiales peuvent s'adapter à un récit en particulier. La formule $\text{Res}_1 \otimes \text{Res}_2$ permet d'exprimer la disponibilité des deux ressources Res_i . La formule $!\text{Res}$ permet la disponibilité de Res autant de fois que nécessaire. Dans notre exemple, nous définirons des ressources atomiques comme P pour le poison, R , B et G pour les disponibilités respectives de Rodolphe, Binet, et Guillaumin. Nous choisissons de ne pas forcer l'utilisation du poison et l'occurrence d'une conversation avec Binet, et modelisons donc :

$$\mathcal{R} = P \& 1, R, G, B \& 1.$$

Représentation des Actions Narratives

Act représente la catégorie syntaxique pour les actions \mathcal{A} . Une action narrative simple est de la forme : $\text{CRes} \multimap \text{Context}$, où CRes est une description finie des ressources, et Context une conjonction multiplicative des ressources et actions. Sa sémantique est donc précisément définie par la manière dont elle affecte l'environnement d'exécution : l'exécution d'une action narrative dans le récit correspond à l'application de la règle \multimap gauche dans la preuve, consommant un nombre fini de ressources modélisée par CRes (dans le sous-ensemble considéré dans ce travail, nous restreignons la sémantique des actions à la consommation de ressources et non pas, par exemple, d'autres actions) et introduisons dans le séquent la formule Context qui représente les ressources rendues disponibles au travers de cette exécution.

Pour notre exemple, nous modélisons les actions narratives suivantes :

$S \multimap A$	Emma se vend (ce qui sauve sa vie).
$E \multimap A$	Emma s'échappe avec Rodolphe (ce qui sauve sa vie).
$P \multimap D$	Emma ingère le poison et meurt.
$R \multimap 1$	Emma converse avec Rodolphe. Cela ne change rien à la situation.
$R \multimap E$	Emma converse avec Rodolphe et s'accorde sur le fait de fuir ensemble.
$G \multimap 1$	Emma converse avec Guillaumin. Cela ne change rien à la situation.
$G \multimap S$	Emma converse avec Guillaumin, et accepte le principe d'une relation avec lui en échange de son aide.
$B \multimap 1$	Emma converse avec Binet. Cela ne change rien à la situation.
$B \multimap S$	Emma converse avec Binet et accepte le principe d'une relation avec lui en échange de son aide.

Les actions narratives peuvent être composées. En particulier, elles peuvent offrir deux types de choix. Une action composée $\text{Act}_1 \oplus \text{Act}_2$ correspond à un choix entre les deux actions qui peut servir à représenter l'impact d'une interaction dans une hypothèse monde ouvert. Lorsqu'une telle formule est décomposée avec la règle \oplus , les deux sous-preuves résultantes sont interprétées comme deux possibilités au sein du récit. La preuve permettra d'assurer que chacune est bien formée. Par opposition, une action composée $\text{Act}_1 \& \text{Act}_2$ correspond à un choix lié au mécanisme de recherche de preuve. Si les deux possibilités fournissent une preuve du séquent, ceux-ci seront interprétés comme des récits différents.

Dans notre exemple, nous modélisons :

$$\mathcal{A} = !(S \multimap A), (E \multimap A) \& 1, (P \multimap D) \& 1, (R \multimap 1) \& (R \multimap E), (G \multimap 1) \oplus (G \multimap S), 1 \oplus ((B \multimap S) \& (B \multimap 1))$$

L'action composée $(G \multimap 1) \oplus (G \multimap S)$ reflète une fourche de deux sous-récits possibles (interaction), tandis que $(E \multimap A) \& 1$ peut générer un récit où l'action modélisée par $E \multimap A$ se produit (Emma survit).

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma \vdash A : \nu_1 \quad \Delta, B \vdash C : \nu_2}{\Gamma, \Delta, A \multimap B \vdash C : \nu_1 \succ \nu_{A \multimap B} \succ \nu_2} (\multimap_{left}) \\
\frac{\Gamma \vdash A : \nu_1 \quad \Delta \vdash B : \nu_2}{\Gamma, \Delta \vdash A \otimes B : \nu_1 \parallel \nu_2} (\otimes_{right}) \\
\frac{\Gamma, A \vdash C : \nu_1 \quad \Gamma, B \vdash C : \nu_2}{\Gamma, A \oplus B \vdash C : \nu_1 \nabla \nu_2} (\oplus_{left})
\end{array}
\qquad
\begin{array}{c}
\frac{}{\Gamma \vdash A : \emptyset} (Leaf\ rules) \\
\frac{\Gamma \vdash A : \nu}{\Gamma' \vdash A' : \nu} (Unary\ rules) \\
\frac{\Gamma \vdash A : \nu_1 \quad \Gamma \vdash B : \nu_2}{\Gamma \vdash A \& B : \nu_1 \nabla \nu_2} (\&_{right})
\end{array}$$

FIGURE 2.10 – Fonction d’interprétation d’une preuve en récit non linéaire ν : la fonction est définie récursivement à partir de la dernière règle ILL appliquée. $\nu_{A \multimap B}$ dénote l’action initialement spécifiée avec la formule $A \multimap B$

Etats narratifs finaux

$Goal$ est la catégorie syntaxique de l’état final du récit. $Goal_1 \otimes Goal_2$ exprime que tous les états $Goal_i$ sont accessibles à la fin du récit. $Goal_1 \oplus Goal_2$ exprime que les états $Goal_i$ sont accessibles, mais lequel sera atteint dépend de la preuve et peut différer selon la branche du récit considérée. $Goal_1 \& Goal_2$ exprime que chaque état est accessible, mais que celui qui sera atteint dépend d’un choix externe au récit, comme une intervention utilisateur.

Dans notre exemple, nous modélisons qu’une histoire donnée peut fournir deux fins distinctes : à partir des atomes représentant les états finaux A (Emma est vivante) et D (Emma est morte), nous écrivons la formule $A \oplus D$ à la droite du séquent.

Ceci conclut notre spécification que vous pouvez retrouver figure 2.11.

Stabilité de la représentation

Nous avons montré le résultat suivant :

Résultat 2.2.1 *Étant donné un séquent ILL respectant la grammaire décrite dans la figure 2.9, tous les séquents apparaissant dans la preuve seront de la forme $\Gamma \vdash G$, où $\forall F \in \Gamma$, F est une formule *Context* et G est une formule *Goal*.*

En d’autres mots, tous les séquents apparaissant dans une telle preuve seront composés d’un contexte décrivant les ressources et actions du récit, et d’une formule à droite représentant des contraintes sur l’état final du récit.

La preuve de cette propriété a été effectuée en Coq, et figure dans le papier [20].

C’est une propriété qui a permis de simplifier la recherche de preuve en éliminant l’usage de certaines règles du calcul des séquents d’ILL comme \multimap_{right} .

Des preuves aux récits

Nous décrivons finalement la fonction ν Figure 2.10 qui interprète les preuves de notre fragment en des récits, à partir des traces d’exécution de la règle \multimap gauche, de \oplus gauche et de \otimes et $\&$ droites.

Le langage défini pour décrire le récit utilise les opérateurs suivants :

- \succ est une relation de précédence, permettant de refléter l’ordre partiel dans la succession de deux actions narratives : $\nu = \nu_1 \succ \nu_{action} \succ \nu_2$ est le récit où le récit ν_1 précède l’action narrative ν_{action} qui précède le récit ν_2 .

1. Description du séquent : $\mathcal{R}, \mathcal{A} \vdash \text{Goal}$

Ressources initiales \mathcal{R}	$P \& 1, R, G, B \& 1$
Actions Narratives \mathcal{A}	$!(S \multimap A), (E \multimap A) \& 1, (P \multimap D) \& 1, (R \multimap 1) \& (R \multimap E),$ $(G \multimap 1) \oplus (G \multimap S), 1 \oplus ((B \multimap S) \& (B \multimap 1))$
But de l'histoire Goal	$A \oplus D$

2. Sketch de la preuve obtenue :

$$\begin{array}{c}
\frac{\multimap_{left}: P \multimap D}{\multimap_{left}: R \multimap 1} \quad \frac{\multimap_{left}: E \multimap A}{\multimap_{left}: R \multimap E} \quad \frac{\multimap_{left}: S \multimap A \quad \multimap_{left}: B \multimap 1}{\oplus_{left}: 1 \oplus ((B \multimap S) \& (B \multimap 1))} \\
\frac{\multimap_{left}: B \multimap 1}{\oplus_{left}: 1 \oplus ((B \multimap S) \& (B \multimap 1))} \quad \frac{\multimap_{left}: R \multimap 1}{\multimap_{left}: G \multimap S} \\
\frac{\multimap_{left}: G \multimap 1 \quad \oplus_{left}: 1 \oplus ((B \multimap S) \& (B \multimap 1))}{\oplus_{left}: (G \multimap 1) \oplus (G \multimap S)} \\
\hline
\mathcal{R}, \mathcal{A} \vdash A \oplus D
\end{array}$$

3. Récit correspondant :

$$(\nu_{G \multimap 1} \succ ((\nu_{B \multimap 1} \succ \nu_{R \multimap 1} \succ \nu_{P \multimap D}) \nabla (\nu_{R \multimap E} \succ \nu_{E \multimap A}))) \nabla \\
(\nu_{G \multimap S} \succ \nu_{R \multimap 1} \succ (\nu_{S \multimap A} \nabla (\nu_{B \multimap 1} \succ \nu_{S \multimap A})))$$

FIGURE 2.11 – Les multiples fins d'Emma

∇ est un choix au sein du récit : $\nu = \nu_1 \nabla \nu_2$ est un récit où les deux sous-récits ν_1 et ν_2 sont possibles, mais seulement l'un des deux aura lieu, selon un événement externe dans une hypothèse de monde ouvert.

\parallel représente la mise en concurrence de deux récits : $\nu = \nu_1 \parallel \nu_2$ est un récit lors duquel les sous-récits ν_1 et ν_2 pourront se dérouler de manière indépendante.

Grâce à notre encodage d'ILL dans Coq, et à l'aide de tactiques simples, nous avons pu générer une preuve du séquent $\mathcal{R}, \mathcal{A} \vdash A \oplus D$ spécifié. Une telle preuve est alors interprétée comme un récit (Figure 2.11) : selon l'impact d'un choix externe, le récit peut prendre deux chemins différents. Dans l'un d'eux, deux chemins mènent à un dénouement lors duquel Emma survit. Dans l'autre, l'un des chemins peut mener au décès d'Emma, suivant le déroulement de la conversation avec Rodolphe.

2.2.3 Utiliser l'assistant de Preuve Coq pour l'analyse de propriétés narratives

L'encodage d'ILL dans Coq réalisé par Pierre Courtieu et Julien Forest est toujours disponible⁵.

En sus de l'utiliser pour construire des récits cohérents à partir de notre spécification initiale, nous l'avons utilisé pour vérifier des propriétés des récits générés. Par exemple, nous voulons pouvoir exprimer et vérifier des propriétés vérifiées par l'ensemble des récits générés par une spécification donnée. Ceci implique de pouvoir raisonner sur les preuves, ainsi que sur les ensembles de preuves.

Coq est un assistant de preuve fondé sur l'isomorphisme de Curry-Howard. C'est donc un outil particulièrement approprié pour ce type d'étude, car il permet de considérer les preuves comme des objets de

5. Téléchargement, accédé en Juillet 2022 : http://cedric.cnam.fr/~courtiep/downloads/ill_narrative_coq.tgz

premier ordre.

Considérons la question de l’accessibilité d’un état narratif final donné, quel que soit l’impact d’événements externes sur le récit : l’établissement d’une telle propriété peut se faire de manière automatique à l’aide d’une fonction dédiée. Nous avons également défini une méthode qui permet de prouver cette propriété pour tous les récits possibles spécifiés par un séquent. C’était moins évident car il y a potentiellement une infinité de telles preuves. Nous avons décrit dans [20] comment réduire l’espace de recherche pour ce type de preuves à partir d’un certain nombre de lemmes intermédiaires et de tactiques réutilisables, dont certains sont liés à la restriction du langage proposé.

En guise d’illustration, considérons la modélisation ci-dessous, qui permet de donner une autre perspective sur la fin du roman Madame Bovary :

À partir des actions :

B \multimap S	discussion avec Binet : Emma accepte l’idée de se vendre
B \multimap R	discussion avec Binet : Emma decide d’aller voir Rodolphe
G \multimap B	discussion avec Guillaumin : Emma decide d’aller voir Binet
G \multimap S	discussion avec Guillaumin : Emma accepte l’idée de se vendre

On modélise un fragment de récit, ou le résultat de la discussion avec Binet ne sera pas contrôlé, mais laissé à la recherche de preuve. Un choix, événement externe, décidera entre les deux résultats possibles de la discussion avec Guillaumin. On spécifie deux fins possibles pour ce récit. Dans l’un d’entre eux, Emma est prête à se vendre pour améliorer sa situation (S), ou disposée à avoir une discussion avec son ancien amant Rodolphe. Nous voulons montrer que quel que soit le récit généré par cette spécification, il y a toujours une fin possible permettant d’atteindre l’état S.

Le séquent correspondant est

$$G, ((B \multimap S) \& (B \multimap R)) \& 1, (G \multimap B) \oplus (G \multimap S) \vdash S \oplus R$$

La preuve de ce séquent en Coq utilise 47 lemmes auxiliaires, alors que le séquent n’offre qu’un niveau assez modéré de générativité. Chaque lemme est prouvé automatiquement, mais doit quand même actuellement être posé à la main.

Une preuve similaire sur le séquent ci-dessous qui utilise les actions narratives décrites figure 2.11 a nécessité 283 lemmes auxiliaires.

$$P \& 1, (S \multimap A) \& 1, (E \multimap A) \& 1, (P \multimap D) \& 1, S \vdash A \oplus D$$

2.2.4 Limitations, Perspectives

Nous reconnaissons volontiers que bien qu’ouvrant plusieurs voies, ces travaux ne sont pas exploitables directement par des auteurs : notamment les preuves du second ordre sur la forme de toutes les histoires possiblement générées ont été réalisées par mes coauteurs. Ces derniers sont particulièrement expérimentés en Coq.

Ces travaux nous ont permis de montrer qu’une approche établie sur des assistants de preuves est particulièrement intéressante pour vérifier les propriétés structurelles des environnements narratifs. Ils permettent d’automatiser une grande partie du travail, tout en conservant une part d’intervention humaine pour guider ou débloquer les preuves, ou développer des routines pour encore plus d’automatisation. D’autres travaux de mes collaborateurs fournissent des pistes pour finir d’automatiser le type de preuves de propriété que nous avons réalisé. Les idées exposées peuvent être menées plus loin : par exemple, l’approche développée par

mes coauteurs notamment dans [33, 34] pourrait permettre d’implémenter des procédures de certification externes. Un générateur de script Coq permettrait de générer les lemmes à prouver. Il est aussi sûrement possible d’augmenter encore le nombre de résultats d’improuvabilité de certaines formes de séquents pour pallier l’explosion combinatoire.

Du point de vue de la représentation de la narration en ILL, un travail restant à faire est de vérifier si notre restriction correspond à un sous-ensemble bien identifié ou caractérisé de ILL. Concernant les modèles formels de la narration, ce travail au niveau de la forme des preuves permet d’envisager des suites intéressantes, notamment pour la recherche de formes normalisées de récits : par exemple, des formes mettant en évidence des sous-récits parallèles, indépendants du point de vue des ressources. Une autre perspective future de ces travaux est la question de l’évaluation de la variation des récits : à partir de relations d’équivalences entre les preuves et de leurs interprétations narratives, on peut envisager de caractériser formellement ce qui distingue les récits, évaluer et comparer des spécifications d’environnements narratifs.

2.3 Génération Narrative

2.3.1 Premiers pas : le système TeLLer

Afin de favoriser l’application de notre approche de la narration interactive sur les mêmes principes que la planification [106], il faut une solution opérationnelle qui permet de générer des récits interactifs spécifiés dans un fragment de la logique linéaire. Une première tentative en ce sens est le système TeLLer développé courant 2012. Ce système propose de générer et d’interpréter des traces d’exécution d’un programme effectuant du chaînage avant à partir d’un environnement spécifié dans une restriction de la logique linéaire. TeLLer est disponible en open source⁶.

La version de TeLLer achevée en Janvier 2013 permet d’explorer une spécification d’environnement narratif. L’utilisateur peut agir de plusieurs manières avec le système :

- définir la granularité de la partie autonome de la recherche ;
- entremêler des phases de chaînage avant avec des phases de chaînage arrière dans la recherche de preuve ;
- interagir explicitement lorsqu’un choix est requis.

Suivant la tradition de représentation de la causalité par des graphes[102], nous proposons un outil permettant de représenter les structures causales sous-jacentes des récits (souvent désignées par le terme *plot* dans les travaux en narration computationnelle) obtenus par notre système sous forme d’hypergraphe à partir d’une analyse des ressources créées et consommées par les actions.

Par la suite, j’ai proposé avec mes collaborateurs l’utilisation d’un langage basé sur la logique linéaire pour la génération narrative, et nous y avons intégré l’outil d’analyse de traces.

2.3.2 Langages de Programmation Logique Linéaire

La programmation logique linéaire permet d’exprimer naturellement des changements d’états. Un des premiers langages de ce paradigme est Lolli (Hodas et Miller) [70]. Lolli est construit sur le fragment intuitionniste de la logique linéaire. La recherche de preuve se fait à rebours, orientée par un but, et utilise les connecteurs asynchrones [8] qui correspondent à des règles réversibles. Traiter les connecteurs synchrones en chaînage arrière n’est pas automatique, car leurs règles impliquent un choix sur le traitement du contexte. Celf [121] est une extension de Lolli, qui inclut les connecteurs synchrones à l’aide de monades. En Celf

6. <https://github.com/jff/TeLLer>

comme en LolliMon [81] sur lequel il est basé, on peut mêler recherche en avant et en arrière à l'aide de monades. Cela correspond bien au modèle d'interaction que nous envisagions avec le système TeLLer et il a été aisé de transposer nos travaux.

La programmation en logique linéaire a été utilisée dans de nombreux domaines [92] comme le traitement du langage naturel par exemple. Notre proposition d'appliquer ce type de programmation à la narration interactive était nouvelle toutefois.

2.3.3 Des structures de récit bien formés : mettre en évidence la structure causale des récits

Nous avons adapté l'outil d'interprétation des traces d'exécution de TeLLer pour fonctionner avec Celf (*CelfToGraph*⁷). A l'aide de cet outil, on peut automatiquement transformer des termes de preuve générés par Celf en hypergraphes acycliques orientés. De tels graphes représentent des structures de récits (souvent appelés *plots*), en mettant en évidence la causalité narrative. Les nœuds y sont des actions et les transitions représentent des relations de causalité. Il est possible d'ajouter de la sémantique sur les transitions, sous forme de formules booléennes. La structure du graphe de la figure 2.13 par exemple, est générée à partir du programme de la figure 2.12.

Dans ce petit programme, le but `emmaCharlesMarried`, peut seulement être produit par l'action `emmaMarries`. De plus, cette action requiert l'existence de la ressource `grace`, qui peut seulement être produite par l'action `emmaSpendsYearsInConvent`.

Dans tous les graphes, l'action `emmaSpendsYearsInConvent` précède l'action `emmaMarries`. La ressource `escapism` peut être produite par deux actions : `emmaGoesToBall` et `emmaReadsNovel`. Cela signifie que dans des histoires générées, l'action `emmaMarries` peut résulter de chacune des deux actions. Nous utilisons des noeuds OR pour exprimer de tels choix entre deux ressources, comme sur la figure 2.13.

Chaque graphe a un noeud `init` représentant l'environnement initial.

Le graphe de la figure 2.13 met en évidence des causes contributives sous une forme plus usuelle qu'une preuve en logique linéaire.

Les graphes générés sont dépendants de la séquence stricte de déclenchement des actions. Il est donc important de noter qu'il n'y a pas de bijection entre les graphes et les solutions générées par Celf : une solution Celf dira précisément quelle ressource sera consommée par une action. De plus, différentes séquences pourront produire le même graphe. Ainsi, ces derniers permettent d'introduire des classes d'équivalence de récits : deux séquences différentes de solutions Celf ne correspondront à des récits différents que si le modèle causal narratif inféré est différent.

Des fonctions de l'outil *CelfToGraph* nous permettent d'exhiber parmi les structures produites celles qui vérifient certaines propriétés sur la présence des actions ou les liens entre elles.

2.3.4 Programmer un environnement narratif

Je décris par la suite la méthode que nous proposons pour modéliser des environnements narratifs, les programmer et dérouler les récits correspondant en Celf.

7. *CelfToGraph* requiert Celf v2.9 et est toujours disponible ici <https://github.com/jff/TeLLer>

```

% Narrative resources
convent : type.
education : type.
grace : type.
novel : type.
ball : type.
escapism : type.
emma : type.
charles : type.
emmaCharlesMarried : type.

% Narrative actions
emmaSpendsYearsInConvent : type = emma * convent -o {@emma * !grace * !education}.
emmaReadsNovel : type = emma * novel -o {@emma * @escapism}.
emmaGoesToBall : type = emma * ball -o {@emma * @escapism}.
emmaMarries : type = emma * escapism * charles * grace -o {@emma * @charles * @emmaCharlesMarried}.

% Initial environment (resources + actions)
init : type = { @emma * convent * !novel * @charles * @ball
* @emmaSpendsYearsInConvent * emmaReadsNovel
* @emmaMarries * @emmaGoesToBall
}.

% Celf query
#query * * * 3 (init -o {emmaCharlesMarried}).

```

FIGURE 2.12 – Exemple de programme Celf : définition de 4 actions narratives à partir de ressources, d'un environnement initial, et d'une requête qui fera 3 tentatives pour produire la ressource emmaCharlesMarried.

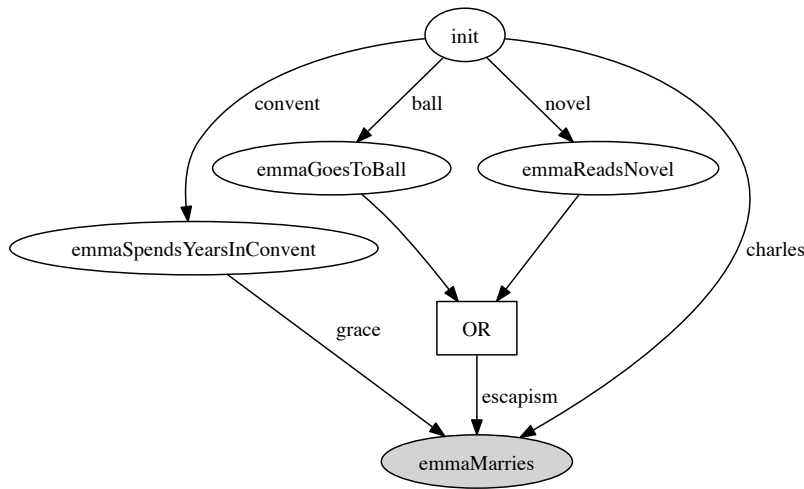


FIGURE 2.13 – Une structure de récit générée à l’aide du programme Celf présenté Figure 2.12. Le nœud *init* représente l’environnement narratif initial. Les autres nœuds sont des actions narratives et représentent les relations de causalité inférées d’une analyse de la consommation des ressources. On labellise ici en plus les transitions avec le nom des ressources permettant la relation causale.

2.3.5 Codage des Éléments narratifs

Nous définissons comme précédemment les actions narratives à partir de ressources narratives et de l’implication linéaire. Par exemple, considérons l’action narrative suivante : *Emma épouse Charles*. Cette action requiert la présence d’Emma et de Charles, et certains faits représentant les motivations de ces personnages : la grâce d’Emma, et son désir d’évasion. Leur mariage crée de nouveaux états : Emma et Charles sont mariés, Emma s’ennuie. Ceci s’écrit ainsi en Celf :

```
emmaMarriesCharles : type = emma * escapism * grace * charles -o
                    {emmaIsBored * @emma * !emmaCharlesMarried}
```

Le langage fait la différence entre les faits non mutables et les faits mutables. Nous représentons ainsi le fait qu’Emma et Charles sont mariés. L’état représentant qu’Emma s’ennuie peut disparaître : une des forces motrices du récit est d’ailleurs son désir d’échapper à l’ennui. Les ressources correspondant à Emma et Charles sont donc ici déclarées respectivement dans l’environnement initial comme étant affines et persistantes, car Emma peut mourir dans l’histoire, alors que Charles est une présence constante dans le fragment modélisé (ligne 38 de la figure 2.14). C’est pourquoi la ressource correspondant à Emma a besoin d’être préservée par une action narrative.

Du point de vue du processus de développement, nous proposons de procéder itérativement pour modéliser ce récit, au fur et à mesure de sa lecture, en ajoutant des ressources au besoin lorsque nous rencontrons une action narrative qui la nécessite. L’action narrative lors de laquelle Emma prend de l’arsenic illustre ce procédé : Emma apprend la mort de son père de la bouche d’Homais (en revenant d’un rendez-vous avec Léon) car Charles craint de la bouleverser. Elle apprend qu’il va y avoir un héritage. Nous modélisons tout d’abord :


```

%% Encoding of an extract of the novel: Madame Bovary.
emma : type.
charles : type.
homais : type.
leon : type.
rodolphe : type.
emmaCharlesMarried : type.
convent : type.

<.....>

emmaIsDespaired : type.
charlesIsConcerned : type.
emmaInLove : type.
leonEmmaTogether : type.
arsenic : type.
inheritance : type.
denounced : type.
ruin : type.
emmalsDead : type.

emmaSpendsYearsInConvent : type = emma * convent → {!novels * !grace * !education * @emma}.
emmaReadsRomanticNovels : type = emma * novels → {@escapism * @escapism * @emma}. %remove one diminishes amount of stories
emmaMarriesCharles : type = emma * escapism * grace * charles → {emmalsBored * @emma * !emmaCharlesMarried}.
emmaInvitedToBall : type = emma * emmaCharlesMarried * grace → {@ball * @emma}.
emmaGoesToBall : type = emma * ball * escapism → {@escapism * @escapism * @escapism * @escapism * @emma}.
emmaDoesNotGoToBall : type = emma * ball → {emmalsBored * @emma}.

< .....>

emmaJumpsThroughWindow : type = emma * emmalsDespaired * emmaRebels → {@emmalsDead}.
emmaGetsSick : type = emma * emmalsDespaired → {@debt * @debt * @debt * @debt * !charlesIsConcerned * @emma}.
emmaLearnsBovaryFatherDeath : type = emma * leonEmmaTogether * charlesIsConcerned * homais →
{@arsenic * @inheritance * @leonEmmaTogether * @emma}.
emmasLoveForLeonFalters : type = emma * leonEmmaTogether * emmaInLove → {@emmalsBored * @emma * @leonEmmaTogether}.
emmaContractsDebts : type = emma * emmalsBored → {@debt * @emma}.
emmaCommitsSuicide : type = emma * ruin * arsenic * emmaRebels → {@emmalsDead}.
init : type =
{ convent * @emma * @leonIsBored * !charles * !rodolphePastLoveLife * !homais
  * @emmaSpendsYearsInConvent
  * @emmaReadsRomanticNovels
  * @emmaReadsRomanticNovels
  * @emmaInvitedToBall
  * @emmaMarriesCharles
  * @(emmaGoesToBall & emmaDoesNotGoToBall)
  <.....>
  * @emmaLearnsBovaryFatherDeath
  * @emmasLoveForLeonFalters
  * !emmaContractsDebts
  * !emmaContractsImportantDebts
  * @emmaBecomesRuined
  * @emmaCommitsSuicide
}.

#query * * * 100 (init → {emmalsDead}).

```

FIGURE 2.14 – Extrait de code Celf, inspiré par un fragment de la nouvelle *Madame Bovary* [48]. Les types atomiques, correspondant aux ressources narratives, sont suivies par les types décrivant les actions narratives, puis par la déclaration de l’environnement initial, et enfin par une requête de 100 récits se terminant par la mort d’Emma. (Le fichier complet contient 105 lignes de code)

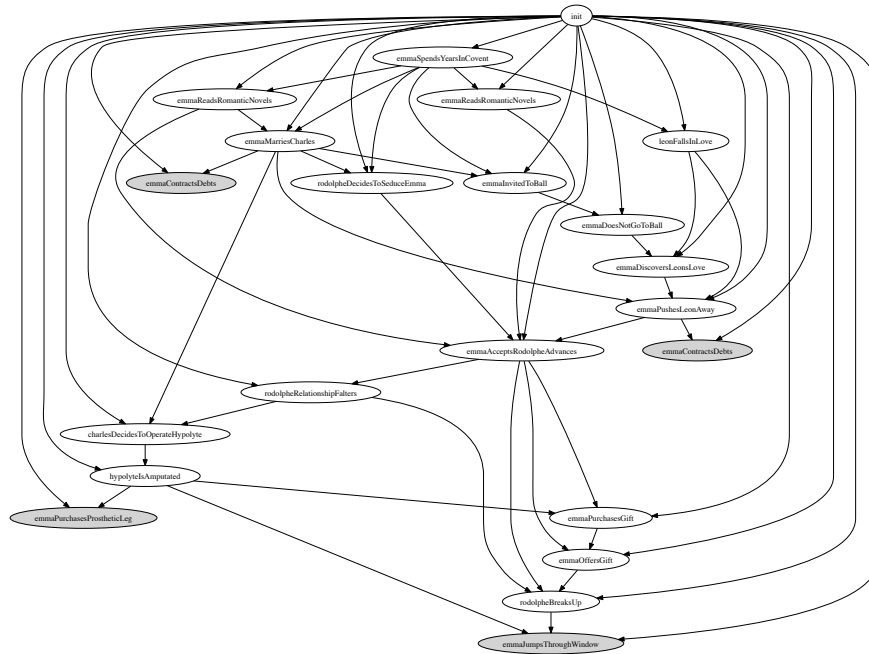


FIGURE 2.15 – L’une des 41 structures causales de récits générés par le code Figure 2.14. Ces structures causales ont été exhibées à l’aide de l’outil *CelfToGraph* développé en collaboration avec Joao F. Ferreira, qui permet également de procéder à des requêtes simples sur les structures générées pour sélectionner les plus intéressantes. Les nœuds en gris sont des actions finales, qui n’auront plus de conséquences. Emma n’assiste pas au bal du Vicomte, mais a toujours ce désir d’échapper à sa vie telle qu’elle est. Elle se défenestre lorsque Rodolphe la quitte.

```
emmaLearnsBovaryFatherDeath : type = emma * leonEmmaTogether * charlesIsConcerned * homais →
    {@inheritance * @leonEmmaTogether * @emma}
```

Lors de ce même dialogue dans le roman, une conversation parallèle a lieu entre Homais et son aide, lors de laquelle Emma entend où est rangé l’arsenic. L’importance de cette connaissance ne devient apparente que lorsque nous modélisons le fragment de roman lors duquel Emma meurt. Nous modifions alors le code :

```
emmaLearnsBovaryFatherDeath : type = emma * leonEmmaTogether * charlesIsConcerned * homais →
    {@arsenic * @inheritance * @leonEmmaTogether * @emma}.
emmaCommitsSuicide : type = emma * ruin * arsenic * emmaRebels → {@emmaIsDead}.
```

Des actions narratives mutuellement exclusives peuvent être suggérées en utilisant le connecteur `&` dans la déclaration des conditions initiales. On peut ainsi les utiliser pour encoder des moment clés du récit, ce qui est fréquemment le cas lorsqu’on utilise des récits existants comme matériel de départ. Nous utilisons ce connecteur pour modéliser le choix d’Emma d’assister au bal du vicomte (ligne 44 Figure 2.14). L’utilisation du connecteur `&` permet de faire varier le récit. Cependant, le principal mécanisme de variation des récits reste la compétition pour la consommation des ressources par les différentes actions narratives.

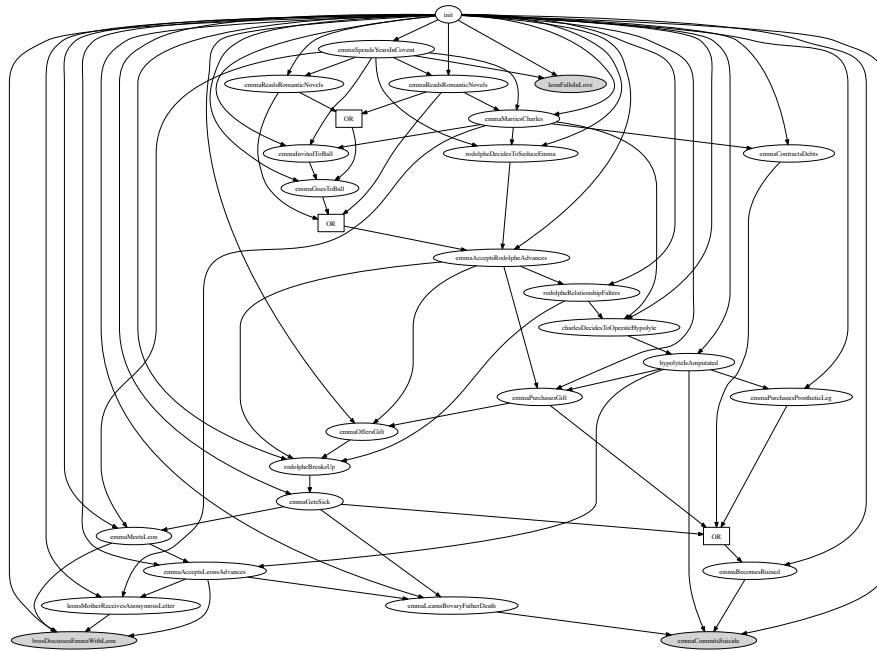


FIGURE 2.16 – L’une des 41 structures causales de récits générés par le code Figure 2.14. Ces structures causales ont été exhibées à l’aide de l’outil *CelfToGraph* développé en collaboration avec Joao F. Ferreira, qui permet également de procéder à des requêtes simples sur les structures générées pour sélectionner les plus intéressantes. Les nœuds en gris sont des actions finales, qui n’auront plus de conséquences. Comme dans l’histoire d’origine, Emma assiste au bal du Vicomte. À la suite du départ de Rodolphe, elle tombe malade. Elle a une liaison avec Léon. Après sa ruine, elle ingère de l’arsenic.

2.3.6 Programmer des environnements narratifs

Ainsi que les exemples ci-dessus le démontrent, l'avantage de la modélisation des récits avec un langage de programmation est la facilité avec laquelle on peut modifier et régler finement le modèle. La programmation est une activité itérative, lors de laquelle on alterne entre des phases de codage et des phases de test et d'évaluation. L'outil que nous avons développé améliore grandement l'évaluation plus qualitative des spécifications narratives, et permet d'alterner de manière fluide entre les deux activités. Ces tests peuvent exhiber des structures de récit respectant certaines caractéristiques. Nous pouvons aussi vérifier si la génération a une sortie variée, différente du récit original comme dans l'exemple 2.15. On peut également vérifier l'impact d'un contrôle narratif plus ou moins ferme sur la variété des récits générés. Par exemple, en garantissant que l'action `emmaAcceptsLeonsAdvances` soit linéaire (se produise exactement une fois) ou non, on peut comparer l'effet sur le nombre et la variété des histoires produites (si l'action est linéaire, un plus petit nombre de récits seront générés, et toutes termineront par la mort d'Emma par empoisonnement). On peut ainsi régler plus finement les ressources nécessaires pour contrôler d'éventuels effets de seuil pour l'occurrence de certaines actions narratives.

2.3.7 Structures de récit générées

La totalité du code correspondant à l'extrait Figure 2.14 consiste en un total de 105 lignes de code, ce qui inclut la description de 31 règles pour la description des actions narratives (le reste du code consiste principalement en déclarations d'atomes pour la description des ressources narratives). Nous n'avons encodé qu'un seul point de branchement explicite, la variété des sorties est due à la variété sémantique des actions narratives (compétition pour consommer les ressources, ou le fait que différentes actions peuvent produire des ressources consommées par une autre), et à la variabilité du chaînage avant. Ce code permet de générer 72 séquences narratives différentes pour 100 tentatives. Après une comparaison des structures de récit correspondant à l'aide de la commande `stats` de *CelfToGraph*, nous pouvons exhiber 41 structures de récit différentes, caractérisées par un graphe différent (certaines séquences d'actions partagent la même structure causale). Cela permet de caractériser des classes de variants des récits, où chaque classe correspond à une *causalité* différente. Les figures 2.15 et 2.16 montrent, par exemple, deux graphes correspondant à deux variantes parmi les récits générés : le premier raconte qu'Emma saute par la fenêtre suite au départ de Rodolphe, et l'autre qu'Emma mourra en prenant de l'arsenic. En regardant le code Figure 2.14 (ll. 31 and 32), deux actions narratives `emmaJumpsThroughWindow` et `emmaGetsSick` consomment la même ressource `emmaIsDespaired`. Lorsque la première action se produit lors du mécanisme de chaînage avant, nous obtenons une histoire finissant avec la défenestration d'Emma. Si notre requête demande 1000 tentatives, nous obtenons 747 solutions, parmi lesquelles 697 correspondent à des séquences narratives différentes, et 226 structures narratives différentes (c'est-à-dire 226 variantes narratives).

2.3.8 Perspectives

Au moment de la publication de ces travaux, nous envisagions plusieurs suites au niveau langage en intégrant certaines idées de TeLLer quant à un paradigme d'interaction approprié à la narration interactive, ainsi que sur une forme normale pour les preuves/structures de récit permettant de représenter et d'identifier facilement les variants possibles.

Par la suite, ces travaux ont été poursuivis par Chris Martens, qui a créé le langage Ceptre, et en a fait le sujet de sa thèse : Ceptre est inspiré par Celf et TeLLer, et dédié à l'écriture d'environnements narratifs[84].

Chapitre 3

Raconter en Interaction dans des Systèmes

Les travaux présentés lors de la partie précédente ont en majeure partie été réalisés lors de la période de ma carrière qui s’est déroulée à l’université de Teesside.

Ma prise de poste à l’ENIB a provoqué plusieurs changements :

- plus d’encadrements ;
- des projets contractuels que j’ai moi-même contribué à piloter ;
- des projets plus appliqués.

Il s’agit donc dans cette partie d’aborder des projets qui ont été en général réalisés dans le cadre de supervisions partagées et collaborations avec des stagiaires de master, des doctorants et post-doctorants.

Ce changement d’équipe a également provoqué une évolution thématique, avec une part croissante de la prise en compte de l’interaction humains-machines. Cela est lié au contexte de travail au Centre Européen de Réalité Virtuelle au sein de l’équipe IHSEV, puis COMMEDIA (que je mène depuis Janvier 2021). La recherche y est souvent appliquée et plus tournée vers l’humain.

Je décris ici trois familles de travaux qui font le lien entre ce que j’ai pu faire par le passé dans la phase décrite au chapitre précédent et mes projets à moyen terme.

Je commence par décrire les contributions du projet ANR ASTRID STRATEGIC à la mise en histoire de traces d’activités, ce projet ayant été directement inspiré par la représentation sous forme de graphes des structures causales sous-jacentes aux séquences narratives générées au travers de la Logique Linéaire. Je présente ensuite un projet de collaboration avec une société qui produit des escape-games en réalité virtuelle dont l’objectif était le monitoring de l’expérience des joueuses et des joueurs pour adapter le temps de jeu. Enfin, je présente les travaux réalisés avec deux de mes étudiants en thèse dans le domaine des personnages virtuels.

3.1 Mise en histoire (Storification) de traces d’actions localisées dans le temps et l’espace

Lors de ce projet, j’ai principalement collaboré avec Ariane Bitoun, Martín Diéguez et François Legras. L’entraînement par la simulation est une forme de pédagogie qui peut utiliser des logiciels (la famille des jeux sérieux dédiés à l’apprentissage). Une telle solution, souvent avantageuse financièrement, fournit un

contexte sécurisé dans lequel les participants peuvent apprendre en constatant les effets de leurs décisions et de leurs actions. Elle est toujours associée à une phase de *debriefing* qui permet aux participantes et aux participants de comprendre ce qui s'est passé pendant l'entraînement [46].

L'entraînement militaire, en particulier, repose souvent sur des simulations qui peuvent être instrumentées pour de l'entraînement collectif ou dédiées à l'entraînement des postes de commandement. Ainsi, l'entraînement peut s'effectuer grâce à des simulations sur des champs de batailles réels, virtuels, constructifs ou mixtes. Quelle que soit la nature de la simulation, celle-ci doit fournir aux entraînés un retour les informant de la manière dont leurs actions ont contribué au succès ou à l'échec de la mission.

Une séance de formation commence par une phase préparatoire, lors de laquelle l'environnement opérationnel réaliste est créé, suivie d'une phase d'exercice lors de laquelle les participants prennent part à la simulation et, enfin, une phase de *debriefing* lors de laquelle les participants échangent (aidés et guidés par un modérateur) afin de comprendre ce qui s'est passé pendant l'entraînement et pourquoi et comment améliorer ou maintenir leurs performances dans des situations analogues à l'avenir. Le moment où cette discussion a lieu et sa durée sont très importants [3] : trop de détails conduisent à un manque de concentration des participants, et si on la retarde trop, les participants peuvent oublier les raisons qui les ont conduits à adopter une ligne de conduite spécifique.

Cependant, l'énorme quantité de données générées durant l'entraînement complique cette tâche¹ : il est très difficile de mettre en forme les données à temps pour préparer le *debriefing*.

Pour proposer une solution à ce problème, nous avons développé un prototype et des cas d'usage d'un outil d'aide à la création narrative, qui permet à un humain de fournir des explications, sous la forme d'un récit illustré, aux autres participants de la simulation. L'idée est de fournir une analyse semi-automatisée du déroulement de la simulation sous la forme d'une reconstruction narrative des causes potentielles des événements qui se sont produits. Suivant une longue tradition de la représentation de la causalité sous forme de graphes [102], nous utilisons des diagrammes pour représenter les événements, leurs causes et conséquences. Ceux-ci peuvent ensuite être intégrés à l'interface de rejeu de la simulation au travers d'un système de *visnettes* qui fournit également aux participants d'autres informations de nature instantanée sur la simulation (figure 3.1).

3.1.1 Utiliser les récits pour faire sens : le cas du débriefing post-simulation

Les humains ont de tout temps utilisé les récits pour faire sens du monde et expliquer le déroulement d'événements passés. Le paradigme narratif a d'ailleurs été utilisé pour les activités de *sensemaking* dans divers domaines [1, 134]. Certaines approches de l'enseignement par le numérique ont également utilisé la narration [37]. Dans le domaine de l'éducation et des jeux sérieux, la *storification* [2] est un terme utilisé pour décrire la création de sens en établissant des liens entre les événements d'une histoire. Un défi dans ce domaine est de pouvoir assister (semi-automatiser) cette activité en s'adaptant à différents profils d'utilisateurs. D'autre part, des travaux en psychologie au sujet de la compréhension des histoires ont aussi montré l'importance de la perception des relations causales entre les événements d'une histoire [131, 132].

Alors que la modélisation de la causalité occupe une place centrale en Intelligence Artificielle [102], le point de vue de l'Intelligence Narrative est plus proche de la notion de *commonsense reasoning* : celui ou celle qui raconte doit sélectionner les événements dignes d'être rapportés, exprimer les liens de cause et conséquence entre eux, et décider du niveau de granularité dans la définition des événements afin que le récit prenne son sens. L'idée est de fournir une explication sous une forme compréhensible par les humains [115]. Cet objectif rejoint certains enjeux que l'on retrouve dans le domaine de l'IA explicable [94]. Cependant, une histoire qu'on raconte fournit également un point de vue (la voix narrative chez Genette [54]). Dans notre

1. Une simulation considérée comme courte peut générer 60000 rapports à traiter

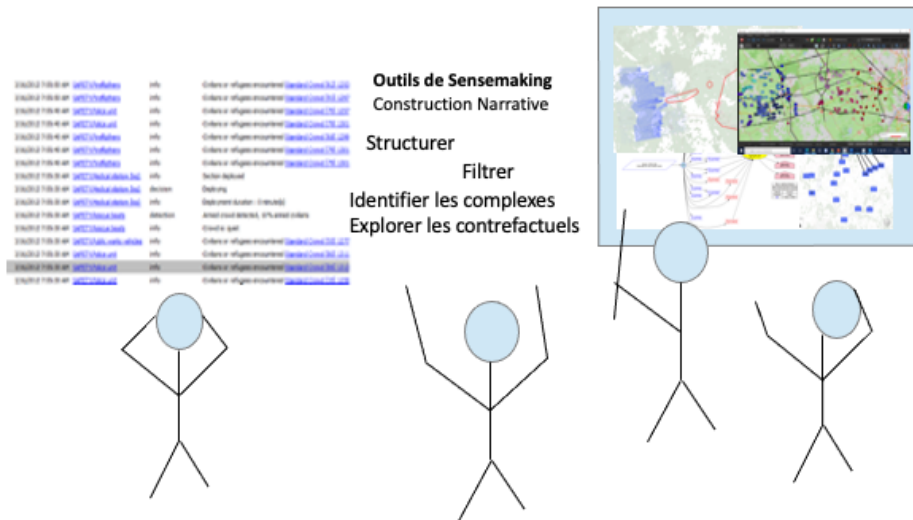


FIGURE 3.1 – Métaphore d’utilisation d’un outil de *sensemaking* narratif pour le *debriefing* de session de simulation.

contexte, à partir de traces brutes, on propose de semi-automatiser la création d’un récit qui se racontera en intégrant le point de vue subjectif de celui ou celle qui raconte.

Notre objectif n’était donc pas de produire un système complètement automatisé : notre système doit permettre la confrontation de plusieurs points de vue lors du *debriefing* ou d’activités d’apprentissage coopératif. Notre système doit pouvoir permettre à chaque participant à la simulation de construire et expliquer son propre récit, subjectif, qui dépendra notamment des informations qui lui étaient disponibles (selon le rôle des participants de la simulation, cela peut varier), et des raisons de leurs décisions. Le tuteur pourra avoir accès à toutes les informations pour construire son récit.

3.1.2 Description de l’architecture proposée

Dans ce projet, nous combinons la représentation de la structure causale des histoires inspirées des travaux décrits au chapitre 2, et des représentations instantanées liées à l’état de la simulation pour les enrichir sémantiquement. Le tout est construit à partir de la description des simulations définies pour SWORD, la simulation de champ de bataille de la société MASA², ainsi que sur les rapports produits par chaque session de simulation.

2. <https://masasim.com/en/notre-metier/defense/>

Une approche de la construction et de l'analyse narrative fondée sur la logique linéaire

Nous modélisons de manière déclarative chaque type d'événement de la simulation en action, en décrivant son impact sur l'environnement en termes de consommation ou de production des ressources. Ceci nous permet de traduire automatiquement la trace produite par la simulation sous une forme qui ressemble à celle utilisée par le système décrit précédemment section 2.3 : en suivant, au fil du déroulement, quelle action va effectivement consommer une ressource produite par une autre action, on peut établir une relation causale entre les deux événements ainsi modélisés.

Une des contributions dans ce projet a été d'appliquer ces mécanismes dans un contexte auquel nous pouvions intégrer deux formes importantes de la compréhension humaine sous l'angle du récit : l'exploration contrefactuelle et la granularité des événements.

- *le raisonnement contrefactuel* est la simulation mentale de scénarios alternatifs de type “et si ...”, où la modification d'un ou plusieurs événements qui se sont produits mènent à la déduction d'une situation alternative. Cette forme de raisonnement joue un rôle central dans les jugements de causalité associés aux événements. En IA, le raisonnement contrefactuel a été formalisé par Lewis [79], qui a fourni une sémantique claire fondée sur des *spheres* et a entraîné de nombreux résultats, par exemple en argumentation [119]. La question a été récemment revisitée par [16] qui a fourni une nouvelle formalisation en *Answer Set Programming*. Explorer des scénarios contrefactuels implique de pouvoir analyser des variants produits par la simulation en mode *rejeu* disponible avec l'outil SWORD, et peut être modifié à cet effet.
- *Granularité* : plusieurs travaux se sont intéressés au lien entre le nombre de relations causales au sein d'un ensemble d'événements et l'importance perçue de cet événement [90, 132, 131]. Ces travaux nous permettent de formuler des heuristiques fondées sur la centralité de certains événements, par exemple, et de les regrouper en un seul événement composé, de niveau sémantique plus complexe. D'autres heuristiques, plus spécifiques au domaine, ont aussi été explorées au sein du projet.

SWORD, une simulation constructive pour l'entraînement militaire

Les modèles qui capturent les comportements des agents simulant les unités par le logiciel SWORD sont composés d'algorithmes qui permettent aux agents de percevoir, se déplacer, de communiquer et de tirer. Ils comprennent également la description des capacités de l'équipement correspondant, stockée dans une base de donnée. La base de donnée pour une session de simulation contient trois types d'informations :

- **Données des éléments physiques** : La constitution des unités est décrite. La simulation étant constructive, la plupart des caractéristiques des équipements ou unités sont décrites par leurs effets ou leurs capacités.
- **Données d'initialisation du scénario** : ceci inclut les informations suivantes : terrain, ordre de bataille, météo, données fournies par la simulation telles que les événements, connaissances obtenues par les agents.
- **Données générées par la simulation, décrivant l'évolution de la situation** : elles incluent tous les événements, les connaissances à propos de l'environnement, et tous les rapports liés aux missions.

Toutes ces informations sont présentées aux participants sous forme de messages échangés par les agents durant la session de simulation. Ci-dessous un exemple de ce qui est présenté aux participants :

```
[07:29:47] - Report - ENG.Counter mobility
            platoon: Disembarkment started
.....
[07:30:17] - Report - INF.Mortar troop: Unit
            detected at ...
```



```

.....
[07:30:17] - Report - INF.Rifle platoon:
                Unit detected at ...

```

Processus de traitement proposé

Après avoir traduit les données de SWORD, les éléments de la simulation et les messages échangés en descriptions d’actions formelles, on procède à une première analyse du flot des ressources manipulées au travers de ces actions, sous une forme analogue à ce qui a été proposé précédemment au chapitre 2. Puis, nous montrons comment le graphe obtenu peut être traité pour soutenir le discours d’un participant qui raconte son expérience. L’outil SWORD est équipé d’une fonction de *rejeu* qui peut donc être améliorée et intégrer ces graphes, qui peuvent alors être eux-mêmes complétés par des *Vignettes* pour représenter des vues instantanées. La sélection des nœuds du graphe importants à explorer se fera à l’aide de routines automatiques ou au choix de l’utilisateur.

3.1.3 Construction du graphe narratif

La production de graphe narratif comporte deux étapes : dans un premier temps, un graphe causal brut est construit à partir des rapports de la simulation pour créer un graphe dont les noeuds sont des événements liés par des relations causales, puis des sous-graphes peuvent être extraits par l’utilisateur, et automatiquement retravaillés afin d’être plus lisibles. Nous avons produit une description formelle des traces des événements

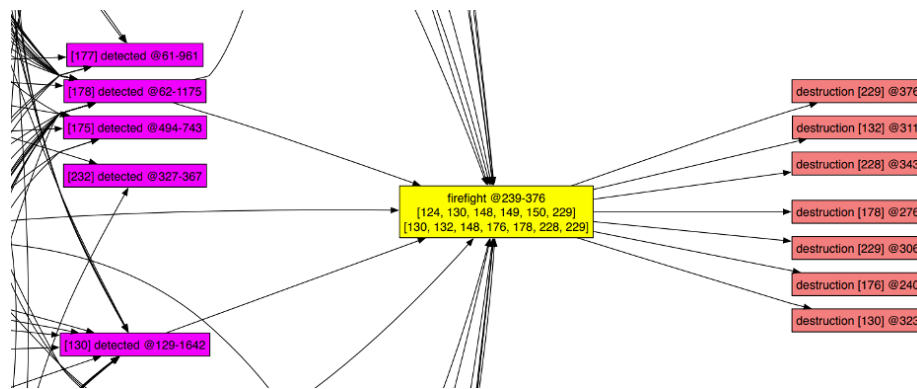


FIGURE 3.2 – Un extrait de graphe post-traitement automatique sur la granularité des événements présentés

SWORD en actions atomiques, qui correspondent aux noeuds du graphe causal brut. Ces actions expriment ce qui, dans la simulation, a été modifié lors de la production de l’événement. Ce composant fournit le moyen de traiter les événements et les traduire en actions automatiquement à partir des bases de données décrivant la session de simulation ainsi que la production du graphe causal *brut* décrivant les causes contributives aux événements. J’ai réalisé l’implémentation actuelle en Go et le processus de génération du graphe à partir des traces prend environ 500ms sur un ordinateur portable de milieu de gamme pour les scénarios les plus complexes. Le graphe produit est décrit dans les formats dot et json, ce qui facilite leur traitement avec des outils standard de traitement et de visualisation.

Les différents types d’événements et de rapports produits par la session de simulation (position et état des unités, échanges de tirs, événement de détection, de déplacement des unités, partage de connaissances entre

unités,...) ont donc tous été traduits en formules de logique linéaire utilisant l'implication linéaire comme connecteur central et la conjonction multiplicative pour agréger les ressources produites et consommées. Les diagrammes construits à partir de l'analyse du flot des ressources dans la succession d'événements est un diagramme acyclique orienté et permet de représenter le réseau des causes contributives entre les événements.

Exploiter le graphe brut : identification de complexes d'événements, requêtes

Les résultats d'analyse narrative sur les exercices réalistes donnent des graphes de très grande taille, même sur des exemples simples. Le scénario nommé Ménéil Annelle est le plus gros scénario d'exercice :

Scénario :	Egypt	Sweden	Ménéil Annelle
nœuds	1902	5760	11891
liens	4021	12620	22668

Les graphes résultants ne sont donc ni représentables, ni à plus forte raison manipulables ou interprétables par un utilisateur, même expert. Nous avons travaillé sur des factorisations automatiques de granularité des nœuds présentés ainsi que réalisé quelques aménagements d'affichage simples.

Nous avons testé des heuristiques de traitement, en commençant par des simplifications (unification des déplacements atomiques par exemple). Nous avons travaillé également sur les contraintes de placement des nœuds du graphe pour en faciliter la lisibilité d'un point de vue temporel, et ainsi faciliter la perception de trajectoires événementielles. Nous nous sommes appuyés sur quelques techniques et heuristiques pour représenter et factoriser les graphes. Cependant, il reste beaucoup à explorer et nous avons identifié ce travail comme un enjeu nécessitant un travail spécifique, intégré aux cas d'utilisations futurs et à des enjeux ergonomiques. En jaune sur la figure 3.2, on peut voir un nœud représentant un échange de tirs, dont la conséquence est la destruction d'unités. Ce sont des missions ayant entraîné des déplacements, qui ont provoqué des détections mutuelles d'unités, qui ont mené à cet échange. Certaines heuristiques que nous considérons prometteuses, comme l'utilisation des bascules de rapport de force, se sont finalement révélées inefficaces et redondantes pour repérer et factoriser les événements marquants par rapport à une analyse de la centralité causale de certains nœuds. En revanche, des mécanismes simples de rassemblements de complexes d'actions à partir de leur proximité spatio-temporelle, ainsi que mettant en valeur la saillance nécessaire de certains événements d'un point de vue métier (destructions, pertes humaines), se sont révélés efficaces. Du point de vue des performances, la production de ce graphe narratif peut prendre quelques minutes sur le plus gros scénario, mais une fois généré, les requêtes se font dans des temps interactifs. De plus, nous n'avons pas essayé d'optimiser. Une fois ces traitements appliqués, le graphe *narratif* global obtenu est d'une taille plus à même d'être compréhensible, comme l'indique le tableau ci-dessous, mais pas encore autoporteur (pour vous en convaincre, vous pouvez également consulter de loin le graphe narratif du scénario Egypt, le plus simple de nos scénarios réalistes, sur la figure 3.4 :

Scénario :	Egypt	Sweden	Ménéil Annelle
Graphe brut			
nœuds	1902	5760	11891
liens	4021	12620	22668
Graphe narratif			
nœuds	326	973	2072
liens	503	1429	2798

Des filtres peuvent ensuite être appliqués, et offrent des vues partielles du graphe narratif. Par exemple, on peut demander l'histoire d'une unité spécifique, ou inventorier les événements qui forment les causes d'un

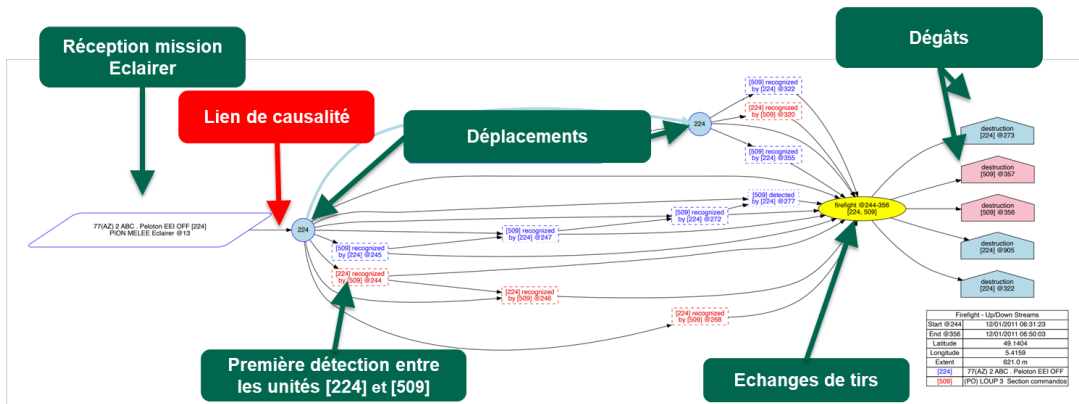


FIGURE 3.3 – La portion de graphe narratif relatif à l'unité 224

événement donné. Le graphe en résultant détaille les missions des unités concernées, leurs déplacements, les ennemis détectés, les échanges de tir et les dommages. Les vues peuvent alors être enrichies de vignettes décrivant les contextes opérationnels.

3.1.4 Cas d'utilisation proposé

Les heuristiques de type bascules de rapport de force (rebondissements, conflits et adversité) ainsi que d'autres que nous avons identifiées lors de travaux parallèles au champ d'investigation principal du projet n'ont pas toutes donné des résultats très intéressants du point de vue de la factorisation des événements dans le graphe. Elles peuvent cependant toujours se révéler pertinentes pour une identification des moments saillants d'une simulation, proposant ainsi à l'utilisateur des points d'entrées méritant une investigation plus poussée pour l'analyse de la simulation.

En guise d'illustration de l'intégration future de nos résultats dans la simulation SWORD, nous décrivons un cas d'utilisation, que vous pouvez trouver plus détaillé dans [18]. La manœuvre pour l'objectif des entraînés, conquérir une zone occupée par les ennemis, est un succès, mais il y a de nombreuses pertes. Il apparaît que l'essentiel des pertes est constituée d'un bataillon de reconnaissance. Un rejeu de la simulation SWORD propose alors que les circonstances autour de ce bataillon doivent être étudiées pour essayer d'identifier les causes de ces pertes et déterminer si elles auraient pu être évitées.

Pour comprendre l'origine des pertes, on extrait alors une partie du graphe narratif centrée sur l'une des patrouilles d'éclairage détruites (figure 3.3). Cet extrait permet de comprendre facilement son histoire et de la raconter, quand on sait que les entraînés sont figurés en bleu et leurs ennemis en rouge : la patrouille d'éclairage AT4CS [224] reçoit la mission « éclairer » à 11h35 (tic 224), elle se déplace et rencontre l'unité ennemie [509] deux minutes plus tard (tic 245). Les deux unités se détectent mutuellement, échangent des tirs et se créent mutuellement des dégâts entre 11h43 (tic 273) et 12h21 (tic 500). Pour une meilleure compréhension, il semble alors utile de regarder une synthèse de la situation tactique à cet instant. Les vignettes permettront de compléter l'analyse en proposant une visualisation instantanée du contexte tactique lorsque l'unité [224] a été prise à partie à partir du tic 273. Elles permettront de montrer que l'unité était alors isolée en première ligne, éloignée de plus de 8km des plus proches forces de combat.

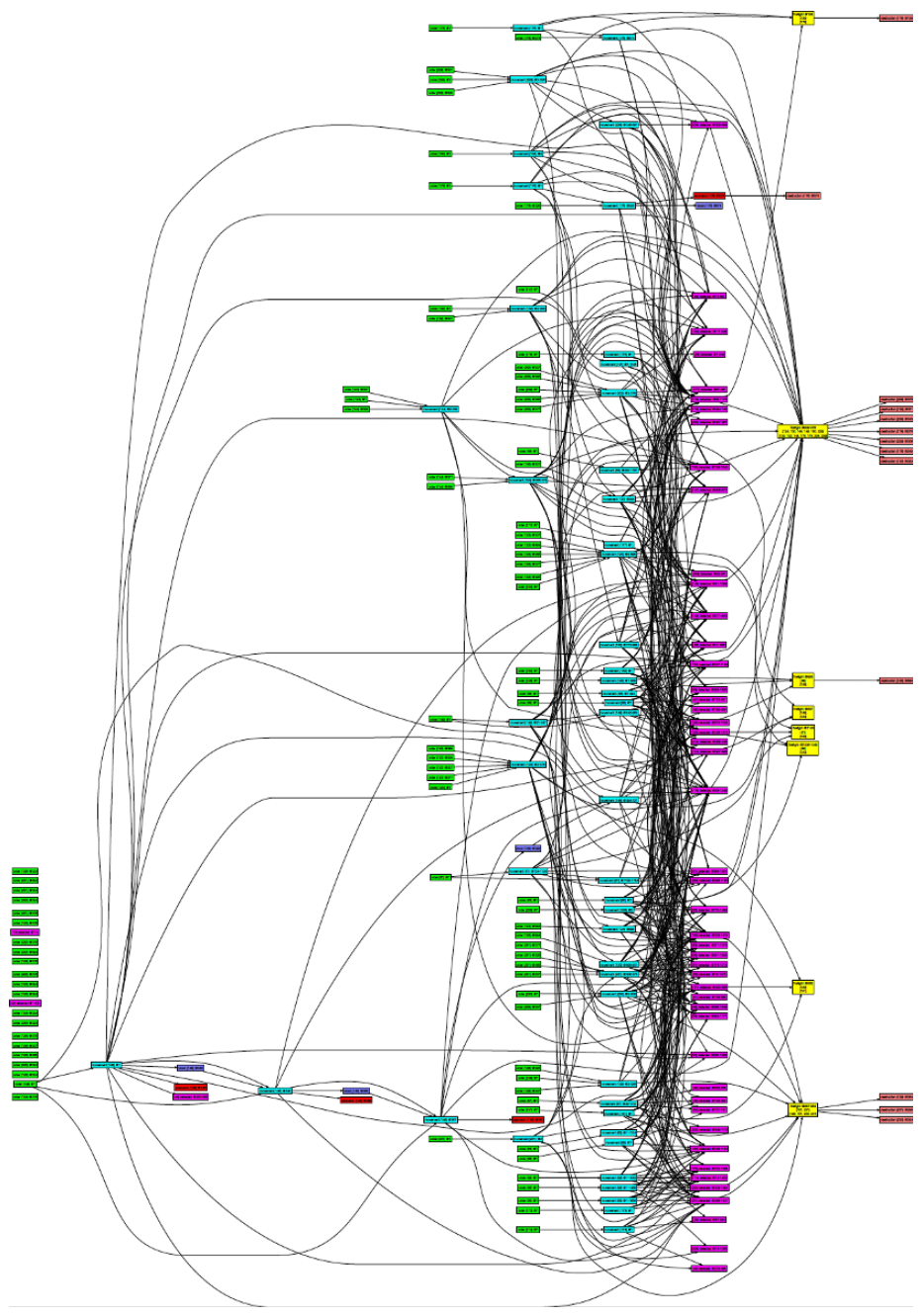


FIGURE 3.4 – Le graphe narratif complet pour le scénario réaliste le plus simple, Egypt (pas encore auto-porteur!)

3.1.5 Travaux proches

Niehaus et al. [98] préconisent l'intelligence narrative pour le *sensemaking* et évoquent des applications potentielles dans le domaine militaire, de la santé ou le milieu des affaires. Ils préconisent une approche fondée sur l'apprentissage machine. Nos travaux diffèrent dans l'approche : nous voulons que les participants de la simulation soient capables de produire eux-mêmes (avec l'assistance de l'outil) ce qui s'est passé, de leur propre point de vue. Bien que nous ayons envisagé d'incorporer dans l'avenir un peu d'apprentissage machine supervisé pour faciliter les tâches répétitives, nous ne cherchons pas à réaliser un système de storification complètement automatique.

Le système *Bardic* [13] propose des *narrativisations* pour décrire l'activité dans des domaines complexes. Ce système traduit un fichier de log donné en une théorie logique du premier ordre exprimée avec *Impulse* [41] basé sur des intervalles de Allen [4]. Le système produit un graphe causal. Il y a plusieurs similarités entre ces travaux et les nôtres : les deux systèmes sont fondés sur des logiques, et les deux outils sont orientés vers la production de graphes causaux à partir de données brutes. La manière d'extraire ce graphe brut est un peu différente. *Bardic* repose sur une approche qui fonctionne sur des modifications d'états. Nous travaillons à partir d'une représentation des ressources et de leur consommation, ce qui nous fournit une représentation plus détaillée et générique (les états aussi peuvent être encodés sous forme de ressources), plus à même de représenter les liens de causalité au sein du réseau, moins ad-hoc.

3.1.6 Perspectives et travaux futurs

Plusieurs pistes de travaux futurs ont été identifiées à l'issue du projet. Des travaux concernant l'introduction de la notion de ressource dans le paradigme sous-tendant ASP (sémantique *stable models*) ont été envisagés un temps. Cette proposition permettrait à terme de combiner les avantages d'une représentation des ressources qui a fait ses preuves en narration computationnelle [86] avec un langage de programmation logique de niveau industriel. À terme, cela faciliterait l'intégration de travaux similaires aux nôtres dans d'autres applications que *SWORD*. Nous avons également identifié plusieurs pistes pour améliorer le graphe narratif : par exemple, des techniques de classification ont été envisagées dans l'objectif de déterminer la probabilité d'apparition d'une séquence d'actions, de détecter les séquences peu probables, voire de prédire la suite d'une séquence, avec comme objectif à terme d'identifier des anomalies. Les nœuds connecteurs du graphe pourraient également se révéler intéressants pour identifier les événements saillants. Enfin, nous avons envisagé de combiner des techniques d'énumération de motifs dans les graphes (tels que [29]) avec des motifs dynamiques issus de la narratologie structurale pour proposer des factorisations d'événements d'un niveau sémantique élevé. Pour finir, le projet *STRATEGIC* a permis d'explorer l'utilisation d'outils de storification pour le *debriefing* de séances de formation par la simulation. Ces outils assistent la construction de supports pour les personnes entraînées et leurs tuteurs, mêlant des représentations causales sous forme de diagrammes à des vues instantanées décrivant le contexte à des moments choisis (sous forme de vignettes). Nous remarquons que ces techniques peuvent être adaptées à d'autres types de simulation que celle que nous considérons, qui relève du domaine militaire.

3.2 Pilotage des histoires interactives en RV

Dans cette section, je décris une application de mes travaux dans le domaine du jeu vidéo immersif dans le cadre d'une collaboration industrielle. Lors de ce projet, j'ai eu l'occasion de collaborer avec Thomas Cabioch, Ronan Champagnat, Jean-Noël Chiganne et Martín Diéguez.

Les applications développées par la société Incarna sont des expériences immersives multi-utilisateurs. Les participantes et les participants, équipés de casques de réalité virtuelle, partagent un espace virtuel dans lequel ils prennent part à une histoire. Ils sont les protagonistes de cette histoire. Contrairement à ce qui se passe dans des jeux de rôle, les participants agissent en tant qu'eux-mêmes : les interactions et la communication sont possibles entre eux, mais ils partagent la même vision de l'application et pilotent le récit comme une seule entité (il ne devrait pas y avoir de point de vue différent).

En parallèle, un opérateur humain (que nous appellerons ici le narrateur), guide l'expérience depuis l'extérieur de la simulation immersive. Idéalement, les participants ne devraient pas avoir conscience de son influence sur le déroulement narratif qui doit rester discret ou en tout cas se produire de manière cohérente avec l'expérience narrative. Le rôle du narrateur est de s'assurer que les joueurs apprécient l'expérience, ce qui implique des ajustements dynamiques pour s'assurer que le niveau de défi fourni corresponde à leurs compétences. Il s'agit en effet d'un élément essentiel d'une conception de jeu bien équilibrée (voir par exemple [9]). Une partie importante de la tâche du narrateur est de s'assurer que les participantes et les participants pourront comprendre le récit dans le temps imparti, mais également de s'assurer que le récit ne se déroule pas trop rapidement pour qu'ils ne soient pas déçus par une durée réduite de la session.

Cela passe par la conception d'outils de **pilotage** dédiés, dotant le narrateur des moyens de suivre l'expérience telle qu'elle s'est déroulée jusqu'à présent, de comparer les trajectoires possibles futures de la narration, les actions narratives qu'il reste à dérouler au temps restant pour la session, et de moyens d'interagir avec le système et les participant-e-s afin de les faire parvenir à une résolution narrative des questions en suspens. L'écriture de tels récits nécessite également des outils et des méthodes dédiés, y compris pour valider les propriétés de durée. Nous proposons ici une telle solution, qui peut également être intégrée à des outils de pilotage (comme le suivi des relations causales entre les actions narratives à travers une représentation explicite de l'intrigue, et les moyens de calculer la durée des différents déroulements narratifs possibles dans le temps restant).

Dans ce travail, nous avons adapté la méthode proposée par [36], qui repose sur les idées de [32] : on utilise une traduction d'un séquent en logique linéaire spécifiant des récits interactifs en réseau de Petri. Il est ensuite possible de vérifier certaines propriétés grâce au graphe de couverture du réseau.

Les réseaux de Petri ont déjà été utilisés dans les domaines de la création et du pilotage pour la narration interactive. Par exemple, les auteurs de [11] ont défini une forme de réseaux de Petri hiérarchisés pour modéliser l'histoire et organiser le déroulement narratif dans un moteur de jeu. Ce modèle ne prend pas en compte la durée des actions, ce qui était un problème courant à l'époque. Du côté des moteurs de narration basés sur la planification, la planification temporelle a pu être utilisée pour résoudre un problème du même ordre : synchroniser les actions des agents au moment où elles sont mises en scène [107].

Notre travail a suscité la construction d'un prototype pour tester nos idées. Nous avons utilisé comme cas d'école une fiction interactive créée par Alyssa Landry³ et utilisée avec sa permission, inspirée d'une version ancienne du conte de Boucle d'Or. Le prototype repose en partie sur le travail de [36] et son code est disponible en ligne⁴.

3.2.1 Déduire les réseaux de Petri

Nous utilisons la méthode définie dans [110] pour dériver un réseau de Petri à partir d'un séquent en logique linéaire :

1. Chaque atome correspond à une place.

3. <https://alysalandry.com/>

4. Code maintenu sur Github par Thomas Cabioch : <https://github.com/cabiocht/ScenarioTools>. Accédé en Juillet 2022.

2. Une formule d'implication linéaire correspond à une transition.
3. Le côté gauche du séquent est constitué de formules d'implication et formules propositionnelles. Il représente l'ensemble des transitions et le marquage initial.
4. Les formules propositionnelles du côté droit du séquent correspondent au marquage final.

3.2.2 Annotations de temps

Afin de raisonner sur le temps en Logique Linéaire, nous avons ajouté des annotations aux atomes en fonction de leur date de production [110]. Dans notre cas, nous considérons aussi des durées estimées du temps de l'action modélisée. Ces durées peuvent être définies lors de la conception de l'histoire. Les annotations temporelles sont calculées lors de la construction du graphe de preuve, les atomes présents dans le marquage initial sont considérés comme produits à la date 0. Lorsque l'on passe par une transition (implication linéaire), on regarde les annotations temporelles de tous les états présents. On additionne aussi les valeurs maximales des temps de réalisation minimum et maximum (associés à l'action modélisée) de l'état aux estimations temporelles associées aux actions. Il est alors possible d'estimer la durée des déroulements possibles de l'histoire.

3.2.3 Vérification de propriétés temporelles en utilisant les réseaux de Petri

Nous voulons vérifier différents types de propriétés : par exemple, pour qu'un scénario soit validé, toutes ses instances doivent mener à l'une des fins souhaitées et la durée visée doit être dans les limites définies au moment de la création. Une approche naïve explorant tous les chemins est ici impossible, car on peut rencontrer des boucles infinies (certaines actions sont toujours possibles). Une façon de contrer ce problème est d'éviter les états qui ont déjà été visités, cela permet d'élaguer les branches infinies. Ce n'est pas suffisant pour aider à l'explosion combinatoire, du fait que beaucoup de chemins correspondent à la simple réorganisation des actions narratives.

Pour résoudre ce problème, nous avons appliqué à notre réseau de Petri l'algorithme décrit par Reynier et al. [113] pour générer l'ensemble minimal de couverture du réseau de Petri. Cet algorithme limite l'exploration en élaguant les nœuds qui ont déjà été explorés dans d'autres branches. Il élague les chemins infinis et réordonne des actions simples. On peut ensuite vérifier qu'elles correspondent à une fin souhaitée et que la durée calculée correspond à celle visée. On peut trouver la description de cette technique sur un exemple complet dans [25].

Du point de vue de l'utilisateur, l'outil développé permet à l'auteur d'identifier rapidement les chemins conduisant à des dénouements non souhaités ou ne respectant pas les exigences en termes de durée en les affichant en rouge par exemple. L'auteur peut alors corriger le chemin une fois qu'il a identifié le problème et relancer l'outil pour vérifier si sa correction était suffisante.

3.3 Personnages Virtuels

Lorsqu'ils se déroulent dans des environnements virtuels, comme des jeux vidéo, les récits nécessitent souvent d'utiliser des personnages virtuels : désignés, selon l'application, de leurs fonctionnalités, et de leur degré d'autonomie sous les termes de bots, agents virtuels, agents conversationnels animés, ou personnages non-joueurs, ces derniers permettent d'instancier les récits interactifs en remplissant les fonctions d'acteurs et de figurants. Après mon arrivée à Brest, j'ai participé à deux projets autour des personnages virtuels, dans le cadre de thèses co-encadrées.

3.3.1 Evaluer la crédibilité des Personnages Virtuels

Ce projet s'est déroulé dans le cadre de la thèse CIFFRE de Cindy Even au sein de la société Virtualys⁵, dirigée par Cédric Buche, et soutenue en 2019.

La principale contribution est une méthode et un système permettant l'évaluation de la crédibilité de joueurs synthétiques, accompagnés d'une étude de ce qui rend les joueurs synthétiques de jeux de tir à la première personne crédibles du point de vue des joueurs humains.

Après un état de l'art des méthodes d'évaluation de la crédibilité des joueurs virtuels [43], nous avons remarqué que la plupart des procédures d'évaluation altèrent l'expérience du jeu, ce qui pose un risque de biais : les joueurs synthétiques sont évalués dans un contexte différent du jeu tel qu'il est joué. Par conséquent, nous avons formulé plusieurs propositions de protocoles et avons présenté plusieurs expériences les utilisant.

Nous avons créé des programmes qui automatisent partiellement l'exécution de la procédure d'évaluation, ce qui rend de tels tests plus faciles à mettre en œuvre. Ces programmes sont partagés⁶. Nous supposons que plus un agent est signalé, moins il est crédible. Nous avons mené une expérience pour tester notre proposition finale.

Tout au long de notre étude, nous avons utilisé le jeu vidéo Unreal Tournament 2004, un jeu de tir et de combat qui se joue à la première personne (c'est-à-dire que la joueuse ou le joueur incarne un personnage et contrôle toutes ses actions), qui est beaucoup utilisé comme plate-forme de test pour les IA des agents virtuels [24], notamment lors de *Bot contests*. Pour faciliter l'exécution de l'évaluation, nous avons développé un système qui automatise partiellement le processus. Le système est chargé d'exécuter les serveurs de jeu et d'y connecter automatiquement les joueurs et les bots. Ce système s'est avéré efficace et flexible puisqu'il a été utilisé avec succès pour la mise en œuvre de plusieurs protocoles que nous avons proposés.

Nous avons testé notre protocole lors de la conférence PFIA en 2017, avant laquelle nous avons organisé un concours de développement de bots, et nous avons demandé aux participants à la conférence de juger les finalistes [44] : nous avons organisé des parties qui regroupaient quatre participants humains et quatre bots. Les humains devaient décider lors de la partie quels personnages étaient contrôlés par d'autres humains et quels personnages étaient contrôlés par des programmes. Nous avons constaté sans surprise que les meilleurs juges sont les joueurs et joueuses qui jouent principalement à des jeux dont la composante principale est le tir de combat. Ces juges ont l'habitude de jouer contre différents types d'adversaires, notamment des bots, des humains inconnus ou des joueurs physiquement présents (ces personnes ont également tendance à jouer régulièrement à des jeux).

Le protocole proposé perturbe au minimum le jeu tel qu'il est habituellement joué, dans le but de minimiser l'impact de l'évaluation [45]. Nous avons créé un formulaire de signalement qui comprend des options permettant de signaler les comportements indésirables que peuvent manifester les bots. Selon notre proposition, les joueurs peuvent ainsi sans le savoir évaluer la crédibilité des joueurs synthétiques grâce à ces formulaires d'alerte qui ressemblent à ceux que connaissent les joueuses et les joueurs pour signaler la présence de bots sur les serveurs. Notre proposition permet donc une mesure objective : le nombre de signalements effectués contre le bot. Nous avons mené une expérience pour valider notre approche et obtenu des résultats prometteurs. En particulier, notre analyse statistique a montré qu'il existe une corrélation négative entre le nombre de signalements et la crédibilité des bots, ce qui répond à notre hypothèse.

Ce protocole permet d'évaluer la crédibilité des bots tout en respectant le gameplay du jeu et en impliquant des joueurs de différents niveaux d'expertise, ce qui constitue une amélioration par rapport aux méthodes d'évaluation établies précédemment.

5. <https://www.virtualys.fr/> Accédé en Juillet 2022

6. <https://git.enib.fr/even/utboteval>, <https://git.enib.fr/even/ut2004-utboteval-mod>

Nous pensons que cette méthode peut s'adapter à différents genres de jeux-vidéos, tels que les jeux d'action, de stratégie, de rôle ou de sport. Pour cela, cependant, différentes options de signalement doivent être proposées en fonction du genre de jeu. Il faudrait alors étudier les comportements nuisibles, et plus particulièrement ceux associés aux bots, dans les jeux vidéo de différents genres. Cela permettrait d'établir des listes d'options de signalement pour chaque type de jeu en vue de son évaluation.

3.3.2 Audiences Virtuelles

Je décris les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Yann Glémarec, qui se déroule en cotutelle entre mon établissement et l'université de Würzburg en Allemagne. Elle est co-encadrée par Jean-Luc Lugrin, Cédric Buche et Marc Latoschik. Mathieu Chollet et Birgit Lugrin ont participé aux premiers travaux.

Motivation : des personnages capables de transmettre une atmosphère

De nombreux systèmes de formation récents en Réalité Virtuelle (RV) utilisent des groupes d'humains virtuels réagissant à l'utilisateur. Par exemple, les systèmes de RV simulant différentes audiences virtuelles ont été utilisés pour réduire l'anxiété liée à la prise de parole en public [31, 66, 15]. On peut utiliser le terme d'*atmosphère* pour décrire comment différents types de groupes d'humains virtuels peuvent être perçus, correspondant à l'attitude perçue par l'utilisateur du système [52]. Ces attitudes perçues doivent être contrôlées pour que le système apparaisse cohérent d'un point de vue affectif : par exemple, dans une application de narration interactive, l'atmosphère rendue par les personnages secondaires qui peuplent l'environnement doit se comporter d'une manière qui évolue avec la tension dramatique ou les événements du récit.

Une audience virtuelle est un *une collection de personnages virtuels situés dans un environnement qui imite une situation de prise de parole en public* [104]. En plus de l'entraînement à la prise de parole en public, ces audiences peuvent être utilisées au sein d'environnements d'entraînement à la gestion d'un public, par exemple pour de futurs enseignants [52, 67, 82, 124], ou pour soigner certains désordres anxieux [135, 7, 73]

Des travaux récents ont identifié un ensemble de comportements non verbaux d'une audience qui sont critiques pour la reconnaissance, la perception de son attitude par les utilisateurs. Il s'agit de combinaisons de mouvements corporels, de regards, de hochements et secousses de la tête, d'expressions faciales et de réponses émotionnelles [104]. D'autres études ont permis de définir un ensemble précis de comportements d'humains virtuels pour simuler cinq styles d'audience distincts : *intéressé et enthousiaste, critique et inquiet, anxieux et menacé, ennuyé et impatient, indifférent et non intéressé* [75].

Dans ce projet, notre objectif est de créer un modèle d'audience virtuelle et son implémentation relativement autonome, crédible et qui s'adaptera en interaction dans les systèmes de réalité virtuelle. Ceci permettra de faciliter leur utilisation au sein des systèmes de réalité virtuelle pour la formation ou la santé. Dans ces contextes, il est souvent souhaitable qu'un enseignant ou thérapeute pilote le déroulement de la simulation, et donc l'attitude de l'audience. Pourtant, ce n'est souvent pas le cas dans les systèmes actuels : soit le comportement de chaque personnage doit être manipulé individuellement [82], soit le programme régit la totalité de l'évolution de l'audience [123]. Nous sommes donc également à la recherche d'un paradigme d'interaction grand-public pour manipuler les audiences virtuelles au sein de telles applications.

Modèle, développement et évaluation d'une audience virtuelle

Le modèle sous-jacent du système a initialement été fondé sur des recommandations issues de recherches antérieures sur la perception qu'a l'utilisateur d'une audience générée sous la forme d'une vidéo sur un écran [30]. Ces recommandations consistent en une description des comportements non verbaux perçus de l'audience et les classe selon la valence et l'éveil perçus. Cette classification s'inspire du complexe des

affects de Russel [117], un modèle classique qui place les émotions humaines sur ces deux dimensions. La valence représente l'opinion de l'audience perçue envers lui par l'utilisateur et l'éveil représente son engagement. Son évaluation a été faite sur 10 agents placés sur deux rangées sur un écran. Les recommandations de ces travaux quant aux comportements non verbaux des personnages virtuels, ainsi que les proportions de personnages virtuels affichant un certain type d'attitude devant être affichés. Par exemple, selon [30], la fréquence de détournement du regard est le comportement le plus influent pour la perception de l'engagement de l'audience et le mouvement de la tête est le comportement le plus influent pour la perception de son opinion, et trois agents affichant un comportement négatif déclencheront probablement la perception d'une audience négative.

Cependant, les casques de RV modifient les perceptions des utilisateurs par rapport aux écrans, et peuvent rendre ce modèle inopérant en RV. En effet, lorsqu'on utilise un point de vue *égocentrique*, en RV, la position, l'orientation et les mouvements des objets sont définis en fonction du corps, ce qui n'est pas le cas avec un écran. Nous avons donc utilisé le même protocole que [30] pour mettre au point un modèle adapté à la RV : pendant la première phase, les utilisateurs étaient invités à concevoir des comportements non verbaux à l'aide de valeurs de valence et d'éveil. Lors la seconde phase de l'expérience, un autre groupe d'utilisateurs a été invité à évaluer l'attitude des audiences. En plus de fournir des recommandations pour la conception d'audiences virtuelles, nous avons ainsi pu mettre en évidence les différences de perception entre les deux contextes techniques d'utilisation. Nos résultats démontrent la capacité de ce premier modèle à créer des audiences virtuelles avec trois types d'attitudes perçues distinctes : indifférent, critique, enthousiaste [61].

Depuis cette évaluation, nous avons enrichi le modèle de signaux environnementaux et comportementaux, notamment de sons et de *backchannels* (par exemple, un hochement de tête accompagné d'un "mmhmm" para verbal signifiant l'accord [17]) en vue de son intégration dans des applications en RV et d'une diffusion du logiciel en *open-source* dans un avenir proche. Nous n'avons pas encore formellement évalué l'effet de ces modifications.

Le système STAGE

Le modèle d'audience a été intégré dans une application d'entraînement à la présentation d'articles scientifiques [60] : STAGE (*Speaking to an Audience in a diGital Environment*⁷). Ce système a été conçu dans le cadre d'un cours. On s'intéresse à la création de narratives pédagogiques, notre système se concentrant sur l'élicitation d'émotions des utilisateurs, sous le contrôle d'un opérateur (généralement un enseignant). Nous avons proposé un composant de contrôle haut-niveau pour réaliser un compromis entre les approches purement Magicien d'Oz ou l'opérateur doit contrôler tous les personnages constituant l'audience individuellement et un système automatique. Le composant permet de sélectionner des attitudes de l'audience, d'en déclencher durant la session, ainsi que de préparer en avance un scénario de son évolution. Pendant la session, l'opérateur a accès à des métriques concernant la performance de l'utilisateur (comme la direction de son regard), et peut choisir de piloter un des personnages de l'audience (par exemple, pour poser une question).

Ce système a été utilisé pour l'enseignement dans le cadre de séminaires donnés par des étudiants lors de la crise sanitaire à l'université de Würzburg et a reçu une bonne réception lors du salon Laval Virtual en 2022 mais n'a pas encore été formellement évalué.

7. <https://www.enib.fr/~glemarec/stage.html>

3.3.3 Perspectives de ces travaux

Les travaux sur les agents virtuels sont ceux qui m'ont le plus fait sortir de ma zone de confort par rapport à mon parcours : l'humain, utilisateur du système était au cœur des enjeux de recherche, et les évaluations étaient centrées sur les utilisateurs. Ils m'ont ouvert de nombreuses perspectives, comme l'envie d'étudier la narration sous un autre angle, celui de ses effets sur les personnes auxquelles elle s'adresse, ainsi que de mettre plus à profit les personnages virtuels comme acteurs des récits, narrateurs virtuels, ou figurants permettant de renforcer l'atmosphère des environnements virtuels en fonction de l'évolution des récits.

Chapitre 4

Perspectives et Applications

4.1 Déplacement : vers les utilisateurs et utilisatrices des systèmes

Ma façon d’approcher la narration computationnelle a souvent relevé de modèles d’analyse du discours en Narratologie Structurale [14, 64], avec une approche formelle : j’ai construit des modèles computationnels de récits parfois interactifs à partir d’idées issues de la narratologie classique en me reposant sur ma formation initiale de logicienne, qui ont permis d’écrire des générateurs narratifs. Dans ces approches, le modèle utilisateur est finalement empirique, intégré par les auteurs et autrices lors de l’écriture et de la mise au point des systèmes. Des approches plus récentes de la narratologie et de la psychologie de la compréhension des histoires intègrent des dimensions « cognitives » à l’héritage Structural, mettant en valeur ses effets sur le lecteur [72, 12]. Je pense que c’est ce qui permet d’envisager la narration comme un paradigme de communication de choix entre l’humain et les systèmes, comme argumenté également par [115]. Mes derniers travaux au CERV, bien que plus appliqués, m’ont permis de commencer à comprendre comment traiter des effets des systèmes sur leurs utilisatrices et utilisateurs : l’environnement et mon équipe, pluridisciplinaire et comportant des chercheuses et chercheurs en psychologie cognitive, a pu influencer cette évolution. Notamment, il y a une forme de similitude entre les phénomènes liés à l’engagement dans les systèmes de réalité virtuelle (la Presence [126]) et certaines théories permettant de caractériser l’engagement des utilisateurs dans la narration, comme celle de la Transportation [63].

Je souhaite participer, dans les prochaines années à l’étude et à la définition des interactions humain-machine basés sur dispositifs narratifs et dialogiques dans les systèmes, en y intégrant une dimension cognitive et affective dynamique. Cela implique de travailler sur deux fronts principaux : sur le premier, on tâchera de modéliser l’utilisateur afin que les systèmes puissent avoir une représentation de ses états mentaux (émotions, connaissances, intentions). De l’autre, il s’agira d’adapter le comportement des systèmes considérés à partir de ces représentations afin d’avoir l’effet voulu (transmettre un message, provoquer un ressenti). Je continuerai donc à m’intéresser aux techniques qui permettent de générer des comportements ou contenus facilitant cette adaptation. Ce sont des domaines de recherche foisonnant ces dernières années mais où encore beaucoup reste à faire.

D’un point de vue pratique, je suis actuellement plusieurs pistes visant à proposer des réponses à ces enjeux, que je détaille ici. Je conclurai par les applications auxquelles j’espère que mes travaux contribueront.

4.2 Modèles pour l'adaptation dynamique de la narration

Je travaille actuellement sur ce thème avec des collaboratrice et collaborateurs au sein de mon équipe, en partenariat avec l'université de Wurzburg.

Nous proposons d'utiliser un modèle dynamique de régulation de la tension narrative, mettant à profit un moteur narratif adaptatif, une représentation affective de l'expérience utilisateur, et des personnages virtuels au sein d'un nouveau dispositif immersif. L'objectif final serait de faire prendre conscience aux utilisateurs et utilisatrices de la façon dont nous produisons nos jugements, et notamment du rôle de l'empathie.

Dans une application interactive, la tension narrative doit être adaptée à l'expérience individuelle pour assurer la cohérence affective du déroulement de l'histoire. Nous voulons créer un moteur narratif adaptatif pour orchestrer les différentes composantes de l'histoire et contrôler les différents éléments de la simulation tout en tenant compte de l'interaction de l'utilisateur. Nous proposerons un modèle de régulation de la tension narrative utilisant une combinaison d'interactions explicites et implicites : celles-ci reposeront sur un ensemble d'indices environnementaux, comportementaux et attentionnels validés expérimentalement.

4.2.1 Modéliser la cohérence affective

Comme nous l'avons vu dans les chapitres qui précèdent, de nombreuses approches dans le domaine de la narration interactive ont abordé le défi de maintenir la cohérence causale de l'intrigue dans un contexte interactif, souvent comme une application de la planification pour organiser correctement les actions narratives (voir [28] pour une introduction datant de 2016). D'autres approches, comme la nôtre, se sont appuyées sur des logiques représentant adéquatement l'action et le changement [19, 41], avec des prototypes reposant sur une certaine forme de programmation logique [85], fournissant parfois des moyens de vérifier formellement les propriétés des récits interactifs [20, 25]. La cohérence affective a comparativement suscité moins d'intérêt, bien que l'on puisse citer des travaux tels que [56], où les auteurs présentent un système utilisant capteurs et traqueurs pour adapter le récit. Avec la disponibilité d'outils pour modéliser l'utilisateur à partir de capteurs [51], la gestion de l'expérience affective de l'utilisateur lors d'une expérience interactive est réalisable et a été étudiée sur la base de systèmes spécifiques (voir par exemple l'interface BCI présentée dans [57]).

La cohérence affective peut être abordée du point de vue de la narratologie : Baroni [12] a proposé que la tension narrative (le phénomène à l'œuvre lorsque l'interprète d'une histoire est encouragé à attendre un résultat avec une attente teintée d'incertitude) est le principal mécanisme de maintien de l'engagement narratif, mettant en avant la fonction thymique (affective) du discours narratif. Il décrit une structure hiérarchique et imbriquée d'une séquence de 3 phases : (1) le nœud, (2) le retard et (3) le dénouement. Des traits affectifs sont associés à la phase (2), lorsque la tension augmente avec ce qui est décrit comme une forme d'anxiété, née de l'incertitude de voir ses attentes se réaliser, créant du suspense ou de la curiosité (lorsque les événements semblent aller contre ou dans la direction des attentes du lecteur). La phase (3) est également décrite en termes affectifs, comme le soulagement ou la paix liée à une sensation d'achèvement. Je me propose d'étudier avec mes collaborateurs la possibilité de mettre en évidence ces différentes phases avec des méthodes objectives, instrumentées ou non, pour différents dispositifs narratifs.

4.2.2 Guider l'expérience utilisateur dans un récit immersif

Un compromis classique dans les expériences narratives interactives est l'équilibre entre la cohérence narrative (cognitive ou affective) et l'agentivité [10]. C'est particulièrement vrai quand on veut combiner un récit immersif avec une interaction incarnée, comme en réalité virtuelle.

Nathalie Le Bigot et moi souhaiterions pouvoir fournir une gamme de signaux attentionnels dédiés et validés expérimentalement pour renforcer la compréhension de l'utilisateur aux niveaux affectif et cognitif en les guidant dans un récit immersif sans rompre l'engagement narratif. L'idée serait de s'appuyer sur les modalités sensorielles visuelle et auditive afin de diriger l'attention des utilisateurs sur certains éléments importants de l'environnement et de les guider dans l'histoire, mais de manière subtile, sans rompre l'engagement de l'utilisateur. De nombreux travaux en psychologie cognitive ont étudié comment l'attention visuo-spatiale s'oriente dans une scène visuelle [108] et les mécanismes concernés dans les changements attentionnels sont bien définis. Plusieurs études ont également identifié des mécanismes de ce type dans des environnements virtuels, qui ont l'avantage de fournir des conditions écologiques et sont interactifs [83, 53, 128]. Nous voulons étudier l'effet de ces signaux environnementaux (visuels et/ou auditifs) sur l'engagement des utilisateurs. Pour ce faire, nous pourrions faire varier la nature des signaux afin d'observer leurs effets sur l'engagement narratif. Par exemple, nous pourrions étudier les déplacements exogènes de l'attention (comme une lumière clignotante dans un coin de la scène visuelle ou un bruit spatialisé), les déplacements avec une plus grande composante endogène (comme une flèche pointant vers le coin de la scène visuelle) ou les déplacements induits par des signaux sociaux (comme un personnage tournant son regard vers un endroit de la scène [127]). Combinés à l'incarnation en environnement virtuel qui peut lui-même avoir un effet sur notre perception [78], ces déplacements attentionnels pourraient provoquer des effets sur les différentes dimensions de l'engagement narratif. Ces effets potentiels pourront être validés de manière expérimentale ou avec des questionnaires comme celui mesurant et caractérisant l'engagement narratif [23].

4.3 Comment raconter pour mieux communiquer ?

Je voudrais également participer au développement des connaissances sur la manière dont nous pouvons utiliser la narration multimédia pour des objectifs communicationnels donnés.

Je projette ici deux orientations principales. Dans la première, suite au projet STRATEGIC décrit section 3.1, je souhaite m'intéresser à la façon dont on peut aider les opérateurs à mettre en histoire des traces d'activité (des événements localisés et datés) afin de comprendre une situation.

Je souhaite continuer à m'intéresser à la communication entre systèmes et utilisateurs, avec deux sujets actuellement le plus souvent abordés hors du contexte narratif : la génération de dialogue et l'humour computationnel.

4.3.1 Compréhension Narrative

Je souhaite poursuivre les travaux décrits section 3.1 lors desquels nous avons abordé le sujet de la storification semi-automatique de traces spatio-temporelles. Nous désirons travailler, au travers d'une collaboration avec une chercheuse spécialiste de la reconnaissance de motifs dans les graphes, si nous pouvons automatiquement reconnaître des motifs correspondant à des motifs narratifs identifiés en narratologie structurale et vérifier si cela correspond bien à des récits soutenant l'explication humaine. Notamment, de nombreux travaux récents sur l'analyse de graphe de communautés, effectués dans le contexte de l'étude des réseaux sociaux, nous semblent pertinents et applicables. Nous pourrions explorer, par exemple, dans quelle mesure les différentes centralités ainsi que les politiques de classification des nœuds dans les graphes, et l'identification des nœuds-connecteurs associés à ces classifications, peuvent être utilisés pour soutenir une mise en histoire d'un système dynamique. Ce sont des notions qui sont abordées dans le domaine de l'analyse et l'exploration de graphes d'interactions (voir par exemple [76], qui propose également des pistes pour la représentation et l'exploration en 3D immersive de tels graphes). J'envisage également d'étudier s'il

est possible de combiner des techniques d'énumération de motifs dans les grands graphes (tels que [29]) avec des motifs dynamiques que l'on peut rencontrer dans les récits.

Lors de ce projet appliqué de storification, nous avons dû faire beaucoup de compromis au niveau du modèle de représentation et les sous-ensembles expressifs de la logique linéaire se sont perdus en chemin. La rédaction de ce mémoire m'a également rappelé que de nombreuses pistes restaient à explorer concernant la représentation et l'analyse des preuves associées aux histoires dont j'ai présenté quelques explorations dans les sections 2.1 et 2.2 : par exemple, la recherche de formes normales pour les preuves ou l'établissement de propriétés intéressantes pour l'analyse et la recherche de preuves de sous-ensembles suffisamment expressifs de la logique linéaire intuitionniste définis en restreignant l'usage des connecteurs suivant une grammaire. Je pense qu'il pourrait être utile de revenir à ces fondamentaux avant de chercher une représentation des preuves qui pourraient être rendues plus accessible aux utilisateurs.

4.3.2 Dialogues narratifs

Avec mes collaborateurs, j'ai commencé à étudier des façons de présenter un récit sous la forme de dialogue [105] : l'idée est de proposer un système qui saurait transformer un récit automatiquement en générant des dialogues, ce qui peut permettre de mettre en valeur les points saillants en fonction d'objectifs communicationnels et d'utiliser les personnages pour présenter différents points de vue. Les systèmes de narration interactive, ont justement pour objectif de fournir des solutions qui s'adaptent en temps réel à un ou plusieurs utilisateurs, tout en assurant une expérience cohérente et structurée à ces derniers (souvent dans le cadre d'une simulation qui peut être immersive). Une des questions qui peut se poser dans leur développement est de pouvoir peupler ces simulations par des agents (personnages) virtuels capables d'interagir naturellement avec les utilisateurs tout en suivant une trame narrative, en respectant sa progression, et en respectant des contraintes de plus haut-niveau (comme la régulation de la tension dramatique par exemple). La génération de dialogues dans les systèmes de narration interactive a été abordée dans de nombreux travaux parmi lesquels on peut citer [89, 26, 100], ainsi que dans un projet de collaboration avec l'industrie auquel j'ai eu l'occasion de participer comme post-doctorante au CEDRIC, CNAM [22]. Selon les travaux, le dialogue peut entièrement être responsable du récit ou doit simplement évoluer pour fournir un arrière-plan cohérent avec son évolution.

Enjeux :

Le verrou scientifique que je souhaite adresser est la conception d'agents conversationnels qui peuvent s'adapter à leurs interlocuteurs en étant capable de faire évoluer dynamiquement les intentions du dialogue et de procurer des informations, comme partie prenante d'une histoire qui se déroule, et en prenant en compte des objectifs conversationnels. C'est un aspect qui est actuellement abordé de manière marginale dans la communauté de recherche des Agents Conversationnels Animés, qui s'intéresse surtout aux aspects émotionnels, à l'interaction multimodale, et à la production d'études sur les usages et l'acceptation de tels acteurs virtuels expressifs. Le domaine de la narration computationnelle fournit un point de vue pertinent sur ces problèmes conversationnels : on s'y intéresse à des systèmes permettant de conduire une histoire avec des multiples objectifs, capables de générer une grande variété de trames narratives.

Dans un tel projet, nous voulons étendre les formalisations existantes des actes de langage (maillon élémentaire formant la trame de l'enchaînement conversationnel) au contexte du dialogue interactif entre humain et agent conversationnel. La difficulté est que les modèles d'analyse langagière ne permettent généralement qu'une approche statique qui n'aborde pas les aspects dynamiques du déroulement conversationnel.

De plus, nous nous trouvons dans un contexte narratif pour lequel les acteurs de l'échange interlocutoire

participent à la co-construction du sens des formes langagières qui font la conversation. Une trame narrative est à découvrir/faire découvrir par l'utilisateur ; trame qui doit faire sens pour lui. L'intérêt d'un tel paradigme d'interaction pour la compréhension narrative constitue un second enjeu important pour ce projet.

L'enjeu est donc ici de modéliser et opérationnaliser :

- l'interaction conversationnelle entre humain et agent dans son déploiement, définie comme une progression de la conversation dans son contexte narratif.
- la dynamique de l'échange interlocutoire découlant des objectifs décrits par les principes issus de la génération narrative.
- l'intention communicationnelle de l'agent virtuel, afin d'atteindre ses objectifs du point de vue narratif.

Du monologue au dialogue en passant par la pragmatique

L'Ecole de Linguistique de Genève [47], a proposé une approche modulaire de l'analyse du discours. Selon cette approche, le discours est composé d'un ensemble fini de composantes combinées dans une représentation hiérarchique. Le dialogue est lui représenté comme une structure hiérarchique composée d'unités dialogiques ou sont organisés *Échanges, Mouvements et Actes du dialogue* [96].

Nous avons commencé à ébaucher comment pourrait s'organiser un système de génération d'arbre de dialogue dans [105], en utilisant les travaux de [116] sur les marqueurs de relations dans le texte. Nous avons proposé de les utiliser pour générer des dialogues en établissant une correspondance avec les structures hiérarchiques du dialogue.

Pour mener à bien le projet il est possible de s'inspirer de [103] sur la planification de dialogue, en étendant l'approche. Il est tentant en ce moment également d'utiliser les grands modèles de langages tels que BLOOM¹.

4.3.3 L'humour des interfaces

L'humour est un aspect émotionnel cognitif et esthétique souvent laissé de côté dans les systèmes de narration interactive. Pourtant, c'est un phénomène complexe et essentiel de la communication humaine, qui existe dans toutes les cultures, bien que sous des formes différentes. Différentes théories de l'humour ont été proposées par le passé, de la théorie de la supériorité à celle de l'incongruité [97]. C'est sans doute le travail de Victor Raskin [112] qui a le plus influencé les modèles computationnels de l'humour dont beaucoup sont basés sur la production et la détection de jeu de mot. Les applications potentielles de l'humour pour améliorer l'interaction humain-machine ont été décrits dans [99] qui liste également des enjeux à venir, et les effets de l'humour sur la Presence et le rappel des messages a également été étudiée [125].

En IA, des travaux ont pu s'intéresser à la détection[95, 101, 118] ou à la génération de jeux de mots (voir ici pour un état de l'art récent [6]). Dans le contexte du projet Joker porté par Liana Ermakova² sur la traduction des jeux de mots, je m'intéresse particulièrement à la génération d'humour. Ce problème a donné lieu à des approches à base de template, comme par exemple [133], mais pour faire progresser les approches utilisant le machine learning, le manque de corpus a souvent été déploré [68]. Un autre enjeu identifié est la traduction automatique des jeux de mots, tâche ardue, en partie car l'appréciation de l'humour est culturelle [40]. J'ai participé récemment à l'organisation de l'atelier JOKER à CLEF2022, lors duquel nous avons proposé aux participantes et aux participants plusieurs tâches liées à la traduction des jeux de mots [42], à l'aide de corpus de jeux de mots traduits de l'anglais, issus d'un corpus de jeux de mots en

1. <https://bigscience.huggingface.co/blog/bloom>

2. <https://www.joker-project.com/>

anglais [95]. Le corpus de jeux de mots en Français ainsi créé a également été utilisé lors d'un atelier que j'ai coordonné [21] pendant la conférence PFIA³.

4.4 Applications

4.4.1 Usages

Il commence à devenir habituel pour tout chercheur et chercheuse d'explicitier quel usage peut être fait de ses travaux, y compris lorsqu'il s'agit de l'éviter. C'est par exemple le chemin montré par la licence Responsible AI⁴. Bien sûr, il n'est pas question de croire naïvement que cet avis va être suivi de tous mais de clarifier ses intentions, et de contribuer à la prise de conscience et aux discussions éthiques sur les usages des progrès actuels en IA et en informatique sociale, ainsi que sur la consommation des ressources qui y sont liées. C'est sans doute également la partie de ce document qui vieillira le moins bien. Il est ainsi possible que je la relise avec embarras dans quelques années, car elle semblera peut-être naïve face à des défis et des valeurs personnelles qui auront évolué.

Le *Storytelling* [120] a souvent été utilisé dans le domaine de la persuasion à des fins de manipulation, et cela peut donc légitimement inquiéter. Le phénomène de Transportation narrative a effectivement été identifié comme un précurseur de la persuasion [63] et a donc des applications en captologie. Il en est de même pour l'humour qui semble avoir des effets persuasifs avérés selon une récente meta-étude [136]. Pourtant, ces deux mécanismes peuvent également permettre de comprendre les phénomènes de désinformation à l'œuvre et être mis à profit pour y remédier [137]. J'aimerais que mes travaux contribuent à la défense intellectuelle individuelle, voire à celle de la société. Il m'apparaît notamment important que chacun ait les outils pour comprendre ses biais, et comment des émotions affectent nos jugements (un exemple est l'empathie, que l'on peut ressentir pour les personnages d'une histoire [23, 71]). Je souhaite contribuer à construire des systèmes qui dévoilent à ses utilisateurs la façon dont ses attitudes et ses jugements se produisent en conscience, et l'aider ainsi à agir conformément à ce qui lui importe (valeurs, objectifs à moyen/long terme).

L'engagement dans des media immersifs peut parfois relever d'une quête de dopamine immédiate, permettant de soulager l'anxiété, mais qui isole (voir la critique dans [5], qui nous recommande de trier ce qui nous importe). Il nous revient donc de conserver ce qui a du sens.

4.4.2 Raconter pour former, transformer et soigner

La réalité virtuelle fournit un contexte sécurisé dans lequel on peut créer un espace permettant aux utilisatrices et aux utilisateurs d'expérimenter des émotions à moindre risque. Ces possibilités ont été utilisées notamment dans le cadre de la santé mentale (voir [50] pour une revue de littérature datant de 2017). L'efficacité des applications de RV autant pour la thérapie que pour la formation dépend fortement du phénomène de Présence, le sentiment « d'être là » [126]. Des travaux suggèrent que la Présence obtenue par le biais d'un environnement virtuel interactif améliore considérablement son efficacité [91]. Ceci peut avoir de nombreuses applications dans le domaine des jeux utiles et expériences transformatives en plus des jeux thérapeutiques soutenant les thérapies cognitivo-comportementales. Ces travaux profiteraient d'un environnement favorable et de collaborations dans mon équipe actuelle.

Je ne saurais cependant renoncer aux potentielles applications artistiques de mes travaux, comme dans le domaine du jeu vidéo, ou pour certaines formes de spectacle vivant, tous deux pouvant être porteurs de sens.

3. Atelier Cécilia lors de PFIA 2022 : <https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/Ateliers/CECILIA/>

4. <https://www.licenses.ai/>

Bibliographie

- [1] Mitchel Y Abolafia. Narrative construction as sensemaking : How a central bank thinks. *Organization Studies*, 31(3) :349–367, 2010.
- [2] Sanne Akkerman, Wilfried Admiraal, and Jantina Huizenga. Storification in History education : A mobile game in and about medieval Amsterdam. *Computers & Education*, 52(2) :449–459, 2009.
- [3] G. Allen and R. Smith. After action review in military training simulations. In *Proceedings of Winter Simulation Conference*, pages 845–849, 1994.
- [4] J. Allen. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26(11) :832–843, 1983.
- [5] Anne Alombert, Victor Chaix, Maël Montévil, and Vincent Puig. *Prendre soin de l’informatique et des générations*. FYP editions, 2007.
- [6] Miriam Amin and Manuel Burghardt. A Survey on Approaches to Computational Humor Generation. In *Proceedings of the The 4th Joint SIGHUM Workshop on Computational Linguistics for Cultural Heritage, Social Sciences, Humanities and Literature*, pages 29–41, Online, December 2020. International Committee on Computational Linguistics.
- [7] Page L Anderson, Matthew Price, Shannan M Edwards, Mayowa A Obasaju, Stefan K Schmertz, Elana Zimand, and Martha R Calamaras. Virtual reality exposure therapy for social anxiety disorder : A randomized controlled trial. *Journal of consulting and clinical psychology*, 81(5) :751, 2013.
- [8] Jean-Marc Andreoli. Logic programming with focusing proofs in Linear Logic. *Journal of Logic and Computation*, 2 :297–347, 1992.
- [9] Maria-Virginia Aponte, Guillaume Levieux, and Stephane Natkin. Measuring the level of difficulty in single player video games. *Entertainment Computing*, 2(4) :205 – 213, 2011.
- [10] R. S. Aylett, S. Louchart, J. Dias, A. Paiva, and M. Vala. Fearnot! – an experiment in emergent narrative. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 305–316, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Daniel Balas, Cyril Brom, Adam Abonyi, and Jakub Gemrot. Hierarchical petri nets for story plots featuring virtual humans. In *AIIDE’08*, 2008.
- [12] Raphaël Baroni. *La Tension narrative : suspense, curiosité et surprise*. Paris : Editions du Seuil, coll. “Poétique”, 2007.
- [13] Camille Barot, Michael Branon, Rogelio E Cardona-Rivera, Markus Eger, Michelle Glatz, Nancy Green, James Mattice, Colin M Potts, Justus Robertson, Makiko Shukonobe, et al. Bardic : Generating multimedia narrative reports for game logs. In *10th International Workshop on Intelligent Narrative Technologies*, 2017.

- [14] Roland Barthes. Introduction à l'analyse structurale des récits. *Communications*, 8(1) :1–27, 1966.
- [15] Ligia Batrinca, Giota Stratou, Ari Shapiro, Louis-Philippe Morency, and Stefan Scherer. Cicero towards a multimodal virtual audience platform for public speaking training. In *International workshop on intelligent virtual agents*, pages 116–128. Springer, 2013.
- [16] Fiona Berreby, Gauvain Bourgne, and Jean-Gabriel Ganascia. Event-based and scenario-based causality for computational ethics. In *Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS '18, pages 147–155, 2018.
- [17] Elisabetta Bevacqua, Sathish Pammi, Sylwia Julia Hyniewska, Marc Schröder, and Catherine Pelchaud. Multimodal backchannels for embodied conversational agents. In *International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 194–200. Springer, 2010.
- [18] Ariane Bitoun, Anne-Gwenn Bosser, Martín Diéguez, and François Legras. Compréhension narrative semi-automatique pour le debriefing de session de simulation. In *Actes de la Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle*, 2022.
- [19] Anne-Gwenn Bosser, Marc Cavazza, and Ronan Champagnat. Linear Logic for Non-Linear Storytelling. *ECAI 2010*, pages 713–718, 2010. Publisher : IOS Press.
- [20] Anne-Gwenn Bosser, Pierre Courtieu, Julien Forest, and Marc Cavazza. Structural analysis of narratives with the Coq proof assistant. In *Proceedings of the Second international conference on Interactive theorem proving*, ITP'11, pages 55–70, Berlin, Heidelberg, August 2011. Springer-Verlag.
- [21] Anne-Gwenn Bosser, Liana Ermakova, Florence Dupin de Saint-Cyr, Pierre De Loor, Victor Charpenay, Nicolas Pépin-Hermann, Benoit Alcaraz, Jean-Victor Autran, Alexandre Devillers, Juliette Grosset, Aymeric Hénard, and Florian Marchal-Bornert. Poetic or humorous text generation : Jam event at PFIA2022. In Guglielmo Faggioli, Nicola Ferro, Allan Hanbury, and Martin Potthast, editors, *Proceedings of the Working Notes of CLEF 2022 - Conference and Labs of the Evaluation Forum, Bologna, Italy, September 5th - to - 8th, 2022*, volume 3180 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 1719–1726. CEUR-WS.org, 2022.
- [22] Anne-Gwenn Bosser, Guillaume Levieux, Karim Sehaba, Axel Buendia, Vincent Corruble, and Guillaume de Fondaumière. Dialogs taking into account experience, emotions and personality. In *Proceedings of the 2nd international conference on Digital interactive media in entertainment and arts*, DIMEA '07, pages 9–12, New York, NY, USA, September 2007. Association for Computing Machinery.
- [23] Rick Busselle and Helena Bilandzic. Measuring Narrative Engagement. *Media Psychology*, 12(4) :321–347, November 2009. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/15213260903287259>.
- [24] Michal Bída, Martin Černý, Jakub Gemrot, and Cyril Brom. Evolution of GameBots Project. In Marc Herrlich, Rainer Malaka, and Maic Masuch, editors, *Entertainment Computing - ICEC 2012*, Lecture Notes in Computer Science, pages 397–400, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer.
- [25] Thomas Cabioch, Ronan Champagnat, Anne-Gwenn Bosser, Jean-Noël Chiganne, and Martín Diéguez. Timing Interactive Narratives. In *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, pages 1–8, August 2019. ISSN : 2325-4289.
- [26] Marc Cavazza and Fred Charles. Dialogue generation in character-based interactive storytelling. In R. Michael Young and John E. Laird, editors, *Proceedings of the First Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference, California, USA*, pages 21–26. AAAI Press, 2005.

- [27] Marc Cavazza and David Pizzi. Narratology for Interactive Storytelling : A Critical Introduction. In *Proceedings of the Third International Conference on the Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment (TIDSE)*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2006.
- [28] Marc Cavazza and R. Michael Young. Introduction to interactive storytelling. *Handbook of Digital Games and Entertainment Technologies*, 2017.
- [29] Raphaël Charbey, Cécile Bothorel, and L. Brisson. Énumération de motifs dans un graphe d'évolution de communautés (Pattern mining in community evolution graph). In *MARAMI*, 2020.
- [30] Mathieu Chollet and Stefan Scherer. Perception of virtual audiences. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 37(4) :50–59, 2017.
- [31] Mathieu Chollet, Giota Sratou, Ari Shapiro, Louis-Philippe Morency, and Stefan Scherer. An interactive virtual audience platform for public speaking training. In *International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 1657–1658, 2014.
- [32] Frédéric Collé, Ronan Champagnat, and Armelle Prigent. Scenario analysis based on linear logic. In *Advances in Computer Entertainment Technology (ACE)*, 2005.
- [33] Évelyne Contejean, Pierre Courtieu, Julien Forest, Andrei Paskevich, Olivier Pons, and Xavier Urbain. A3PAT, an Approach for Certified Automated Termination Proofs. In *ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 10)*, pages 63–72. ACM, 2010.
- [34] Évelyne Contejean, Pierre Courtieu, Julien Forest, Olivier Pons, and Xavier Urbain. The CME Rewriting Toolbox, Version 3.
- [35] The coq proof assistant. <https://coq.inria.fr/>.
- [36] Kim Dung Dang and Ronan Champagnat. An authoring tool to derive valid interactive scenarios. In *Intelligent Narrative Technologies*, 2013.
- [37] Giuliana Dettori and Ana Paiva. *Narrative Learning in Technology-Enhanced Environments*, pages 55–69. Springer Netherlands, Dordrecht, 2009.
- [38] Lucas Dixon, Alan Smaill, and Alan Bundy. Verified planning by deductive synthesis in intuitionistic linear logic. In *ICAPS Workshop on Verification and Validation of Planning and Scheduling Systems*, 2009.
- [39] Lucas Dixon, Alan Smaill, and Tracy Tsang. Plans, Actions and Dialogues Using Linear Logic. *Journal of Logic, Language and Information*, 18(2) :251–289, 2009.
- [40] Henk Driessen. Humor, anthropology of. In James D. Wright, editor, *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences (Second Edition)*, pages 416–419. Elsevier, Oxford, second edition edition, 2015.
- [41] M. Eger, C. Barot, and R. M. Young. Impulse : a formal characterization of story. In *CMN'15*, 2015.
- [42] Liana Ermakova, Tristan Miller, Fabio Regattin, Anne-Gwenn Bosser, Élise Mathurin, Gaele Le Corre, Sílvia Araújo, Julien Boccou, Albin Digue, Aurianne Damoy, and Benoît Jeanjean. Overview of JOKER@CLEF 2022 : Automatic Wordplay and Humour Translation workshop. In Alberto Barrón-Cedeño, Giovanni Da San Martino, Mirko Degli Esposti, Fabrizio Sebastiani, Craig Macdonald, Gabriella Pasi, Allan Hanbury, Martin Potthast, Guglielmo Faggioli, and Nicola Ferro, editors, *Experimental IR Meets Multilinguality, Multimodality, and Interaction. Proceedings of the Thirteenth International Conference of the CLEF Association (CLEF 2022)*, volume 13390 of LNCS, 2022.
- [43] Cindy Even, Anne-Gwenn Bosser, and Cédric Buche. Analysis of the Protocols Used to Assess Virtual Players in Multi-player Computer Games. In Ignacio Rojas, Gonzalo Joya, and Andreu Catala,

- editors, *Advances in Computational Intelligence*, Lecture Notes in Computer Science, pages 657–668, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [44] Cindy Even, Anne-Gwenn Bosser, and Cédric Buche. Bot Believability Assessment : A Novel Protocol & Analysis of Judge Expertise. In *2018 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pages 96–101, October 2018.
- [45] Cindy Even, Anne-Gwenn Bosser, and Cédric Buche. Assessing the Believability of Computer Players in Video Games : A New Protocol and Computer Tool. *Frontiers in Computer Science*, 3, 2021.
- [46] Ruth M Fanning and David M Gaba. The role of debriefing in simulation-based learning. *Simulation in healthcare*, 2(2) :115–125, 2007.
- [47] Laurent Filliettaz and Eddy Roulet. The geneva model of discourse analysis : an interactionist and modular approach to discourse organization. *Discourse Studies*, 4(3) :369–393, 2002.
- [48] Gustave Flaubert. *Madame Bovary*. Centre Flaubert, Université de Rouen, 1857.
- [49] Gustave Flaubert. *Plans et Scénarios de Madame Bovary*. CNRS Editions, 1995.
- [50] D. Freeman, S. Reeve, A. Robinson, A. Ehlers, D. Clark, B. Spanlang, and M. Slater. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*, 47(14) :2393–2400, October 2017.
- [51] Jérémy Frey, Gilad Ostrin, May Grabli, and Jessica R. Cauchard. Physiologically Driven Storytelling : Concept and Software Tool. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–13. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, April 2020.
- [52] Masato Fukuda, Hung-Hsuan Huang, Naoki Ohta, and Kazuhiro Kuwabara. Proposal of a parameterized atmosphere generation model in a virtual classroom. In *International Conference on Human Agent Interaction*, pages 11–16, 2017.
- [53] Jacqueline M. Fulvio and Bas Rokers. Use of cues in virtual reality depends on visual feedback. *Scientific Reports*, 7(1) :16009, December 2017.
- [54] Gerard Genette. *Nouveau Discours du Récit*. Seuil, 1983.
- [55] Pablo Gervás. Computational Models of Narrative Creativity. In Penousal Machado, Juan Romero, and Gary Greenfield, editors, *Artificial Intelligence and the Arts : Computational Creativity, Artistic Behavior, and Tools for Creatives*, Computational Synthesis and Creative Systems, pages 209–255. Springer International Publishing, Cham, 2021.
- [56] Stephen Gilroy, Julie Porteous, Fred Charles, and Marc Cavazza. Exploring passive user interaction for adaptive narratives. In *Proceedings of the 2012 ACM international conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '12, pages 119–128, New York, NY, USA, February 2012. Association for Computing Machinery.
- [57] Stephen William Gilroy, Julie Porteous, Fred Charles, Marc Cavazza, Eyal Soreq, Gal Raz, Limor Ikar, Ayelet Or-Borichov, Udi Ben-Arie, Ilana Klovatch, and Talma Hendler. A brain-computer interface to a plan-based narrative. In Francesca Rossi, editor, *IJCAI 2013, Proceedings of the 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence, Beijing, China, August 3-9, 2013*, pages 1997–2005. IJCAI/AAAI, 2013.
- [58] Jean-Yves Girard. Linear Logic. *Theoretical Computer Science*, 50(1) :1–102, 1987.

- [59] Jean-Yves Girard. Linear logic : its syntax and semantics. In *Workshop on Advances in linear logic*, pages 1–42, New York, NY, USA, 1995. Cambridge University Press.
- [60] Yann Glémarec, Jean-Luc Lugrin, Anne-Gwenn Bosser, Cédric Buche, and Marc Erich Latoschik. Controlling the Stage : A High-Level Control System for Virtual Audiences in Virtual Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 2022.
- [61] Yann Glémarec, Jean-Luc Lugrin, Anne-Gwenn Bosser, Aryana Collins Jackson, Cédric Buche, and Marc Erich Latoschik. Indifferent or Enthusiastic ? Virtual Audiences Animation and Perception in Virtual Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 2021.
- [62] Dieter Grasbon and Norbert Braun. A Morphological Approach to Interactive Storytelling. In *Proceedings of the Conference on Artistic, Cultural and Scientific Aspects of Experimental Media Spaces (cast01)*, 2001.
- [63] Melanie Green and Timothy Brock. The Role of Transportation in the Persuasiveness of Public Narrative. *Journal of personality and social psychology*, 79 :701–21, December 2000.
- [64] Algirdas Julien Greimas. *Sémantique structurale : recherche et méthode*. Larousse, 1966.
- [65] Vineet Gupta and John Lamping. Efficient linear logic meaning assembly. In *Proceedings of the 17th international conference on Computational linguistics*. Association for Computational Linguistics, 1998.
- [66] Sandra R Harris, Robert L Kemmerling, and Max M North. Brief virtual reality therapy for public speaking anxiety. *Cyberpsychology & Behavior*, 5(6) :543–550, 2002.
- [67] Aleshia T. Hayes, Stacey E. Hardin, and Charles E. Hughes. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Systems and Applications : 5th International Conference, VAMR 2013, Held as Part of HCI International 2013, Las Vegas, NV, USA, July 21-26, 2013, Proceedings, Part II*, chapter Perceived Presence’s Role on Learning Outcomes in a Mixed Reality Classroom of Simulated Students, pages 142–151. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [68] He He, Nanyun Peng, and Percy Liang. Pun Generation with Surprise. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, pages 1734–1744, Minneapolis, Minnesota, June 2019. Association for Computational Linguistics.
- [69] Andreas Herzig, Jerome Lang, and Pierre Marquis. Action representation and partially observable planning using epistemic logic. In *Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI)*, 2003. event-place : Acapulco, Mexico.
- [70] Joshua S. Hodas and Dale Miller. Logic programming in a fragment of Intuitionistic Linear Logic. *Information and Computation*, 110(2) :327–365, 1994.
- [71] Martin L. Hoffman. Empathy and prosocial behavior. In *Handbook of emotions, 3rd ed.*, pages 440–455. The Guilford Press, New York, NY, US, 2008.
- [72] Emma Kafalenos. *Narrative Causalities*. The Ohio State University Press, Columbus, 2006.
- [73] Smiti Kahlon, Philip Lindner, and Tine Nordgreen. Virtual reality exposure therapy for adolescents with fear of public speaking : a non-randomized feasibility and pilot study. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 13(1) :1–10, 2019.
- [74] Sara Kalvala and Valeria De Paiva. Mechanizing linear logic in isabelle. In *In 10th International Congress of Logic, Philosophy and Methodology of Science*, 1995.

- [75] Ni Kang, Willem-Paul Brinkman, M Birna van Riemsdijk, and Mark Neerincx. The design of virtual audiences : noticeable and recognizable behavioral styles. *Computers in Human Behavior*, 55 :680–694, 2016.
- [76] Pirizivè Kobina, Thierry Duval, and Laurent Brisson. 3d radial layout for centrality visualization in graphs. In Lucio Tommaso De Paolis and Patrick Bourdot, editors, *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics - 7th International Conference, AVR 2020, Lecce, Italy, September 7-10, 2020, Proceedings, Part I*, volume 12242 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 452–460. Springer, 2020.
- [77] R. Raymond Lang. A declarative model for simple narratives. In *AAAI*, 1999.
- [78] Nathalie Le Bigot and Marc Grosjean. Exogenous and endogenous shifts of attention in perihand space. *Psychological Research*, 80(4) :677–684, July 2016.
- [79] D. Lewis. *Counterfactuals*. Blackwell, 1973.
- [80] Patrick Lincoln. Deciding provability of linear logic formulas. In *Advances in Linear Logic*, pages 109–122. Cambridge University Press, 1994.
- [81] Pablo López, Frank Pfenning, Jeff Polakow, and Kevin Watkins. Monadic concurrent Linear Logic programming. In *Proceedings of the 7th International ACM SIGPLAN Conference on Principles and Practice of Declarative Programming*, 2005.
- [82] Jean-Luc Lugin, Marc Erich Latoschik, Michael Habel, Daniel Roth, Christian Seufert, and Silke Grafe. Breaking bad behaviours : A new tool for learning classroom management using virtual reality. *Frontiers in ICT*, 3 :26, 2016.
- [83] Francesco Maringelli, John McCarthy, Anthony Steed, Mel Slater, and Carlo Umiltà. Shifting visuo-spatial attention in a virtual three-dimensional space. *Cognitive Brain Research*, 10(3) :317–322, January 2001.
- [84] Chris Martens. *Programming Interactive Worlds with Linear Logic*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 2015.
- [85] Chris Martens, Anne-Gwenn Bosser, João F. Ferreira, and Marc Cavazza. Linear Logic Programming for Narrative Generation. In Pedro Cabalar and Tran Cao Son, editors, *Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning*, Lecture Notes in Computer Science, pages 427–432, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer.
- [86] Chris Martens, Joao F Ferreira, Anne-Gwenn Bosser, and Marc Cavazza. Generative story worlds as linear logic programs. In *Seventh Intelligent Narrative Technologies Workshop*, 2014.
- [87] M. Masseron. Generating Plans in Linear Logic : II. A Geometry of Conjunctive Actions. *Theoretical Computer Science*, 113(2) :371–375, 1993.
- [88] M. Masseron, Christophe Tollu, and Jacqueline Vauzeilles. Generating Plans in Linear Logic : I. Actions as Proofs. *Theoretical Computer Science*, 113(2) :349–370, 1993.
- [89] Michael Mateas and Andrew Stern. Natural language understanding in façade : Surface-text processing. In *International Conference on Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment*, pages 3–13. Springer, 2004.
- [90] Lawrence J Mazlack. Granular causality speculations. In *Fuzzy Information, 2004. Processing NAFIPS'04. IEEE Annual Meeting of the*, volume 2, pages 690–695. IEEE, 2004.
- [91] I. Messinis, D. Saltaouras, P. Pintelas, and T. Mikropoulos. Investigation of the relation between interaction and sense of presence in educational virtual environments. In *2010 International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, pages 428–431, 2010.

- [92] Dale Miller. Overview of Linear Logic programming. *Linear Logic in Computer Science*, 316 :119–150, 2004.
- [93] ROB MILLER and MURRAY SHANAHAN. Narratives in the Situation Calculus. *Journal of Logic and Computation*, 4(5) :513–530, October 1994.
- [94] Tim Miller. Explanation in artificial intelligence : Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*, 267 :1–38, February 2019.
- [95] Tristan Miller, Christian F. Hempelmann, and Iryna Gurevych. SemEval-2017 Task 7 : Detection and interpretation of English puns. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic Evaluation*, pages 58–68, August 2017.
- [96] Jacques Moeschler. *Modélisation du dialogue : représentation de l’inférence argumentative*. Hermès, 1989.
- [97] John Morreall. Philosophy of Humor. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Fall 2020 edition, 2020.
- [98] James Niehaus, R. Michael Young, Scott Neal Reilly, Peter Weyhrauch, and James Tittle. Towards intelligent narrative-based interfaces for information discovery. In *10th International Workshop on Intelligent Narrative Technologies*, 2017.
- [99] A. Nijholt, Andreea Niculescu, A. Valitutti, and R. Banchs. Humor in Human-Computer Interaction : A Short Survey. *undefined*, 2017.
- [100] A Onate, G Mendez, and P Gervas. Emolift : Elevator conversations based on emotions. In *10th International Conference on Computational Creativity*, 2019.
- [101] Canberk Özdemir and Sabine Bergler. CLaC-SentiPipe : SemEval2015 subtasks 10 B,E, and task 11. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval 2015)*, pages 479–485, Denver, Colorado, June 2015. Association for Computational Linguistics.
- [102] Judea Pearl. *Causality : Models, Reasoning and Inference*. Cambridge university press, 2009.
- [103] Didier Pernel. *Gestion des buts multiples de l’utilisateur dans un dialogue homme-machine de recherche d’informations*. PhD thesis, Paris 11, 1994.
- [104] David-Paul Pertaub, Mel Slater, and Chris Barker. An experiment on public speaking anxiety in response to three different types of virtual audience. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 11(1) :68–78, 2002.
- [105] Andreea-Oana Petac, Anne-Gwenn Bosser, Fred Charles, Pierre De Loor, and Marc Cavazza. A pragmatics-based model for narrative dialogue generation. In F. Amílcar Cardoso, Penousal Machado, Tony Veale, and João Miguel Cunha, editors, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Creativity, ICCO 2020, Coimbra, Portugal, September 7-11, 2020*, pages 161–168. Association for Computational Creativity (ACC), 2020.
- [106] Julie Porteous, Marc Cavazza, and Fred Charles. Applying planning to interactive storytelling : Narrative control using state constraints. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 1(2) :10 :1–10 :21, December 2010.
- [107] Julie Porteous, Jonathan Teutenberg, Fred Charles, and Marc Cavazza. Controlling narrative time in interactive storytelling. In *AAMAS ’11*, pages 449–456, 2011.
- [108] M. I. Posner, C. R. Snyder, and B. J. Davidson. Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109(2) :160–174, June 1980.

- [109] James Power and Caroline Webster. Working with coq in linear logic. In *Proceedings of the 12th International Conference on Theorem Proving in Higher Order Logics (TPHOL)*, 1999.
- [110] B. Pradin-Chezalviel, R. Valette, and L. A. Kunzle. Scenario durations characterization of t-timed petri nets using linear logic. In *PNPM '99*, pages 208–217. IEEE Computer Society, 1999.
- [111] Vladimir Propp. *Morphologie du conte, traduction du Russe de 2015*. Seuil, 1968.
- [112] Victor Raskin. *Semantic Mechanisms of Humor*. Number 24 in Studies in Linguistics and Philosophy. Springer, 1985.
- [113] Pierre-Alain Reynier and Frédéric Servais. Minimal Coverability Set for Petri Nets : Karp and Miller Algorithm with Pruning. In Lars M. Kristensen and Laure Petrucci, editors, *Applications and Theory of Petri Nets*, Lecture Notes in Computer Science, pages 69–88, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer.
- [114] Whitman Richards, Patrick Henry Winston, and Mark Alan Finlayson. Advancing Computational Models of Narrative. Technical Report MIT-CSAIL-TR-2009-063, MIT, 2009.
- [115] M. O. Riedl. Computational narrative intelligence : a human-centered goal for artificial intelligence. In *Proceedings of the CHI 2016 Workshop on Human Centered Machine Learning*, 2016.
- [116] Eddy Roulet. The description of text relation markers in the geneva model of discourse organization. *Approaches to discourse particles*. Amsterdam : Elsevier, pages 115–131, 2006.
- [117] James A. Russell. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6) :1161–1178, 1980. Place : US Publisher : American Psychological Association.
- [118] Florence Dupin De Saint-Cyr and Henri Prade. Jokes and Belief Revision. *Proceedings of the International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 17(1) :336–340, July 2020. Conference Name : Proceedings of the 17th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning.
- [119] C. Sakama. Counterfactual reasoning in argumentation frameworks. In *Computational Models of Argument - Proceedings of COMMA'14*, pages 385–396, 2014.
- [120] Christian Salmon. *Storytelling*. Éditions La Découverte, 2007.
- [121] Anders Schack-Nielsen and Carsten Schürmann. Celf—a logical framework for deductive and concurrent systems (system description). In *Automated Reasoning*, pages 320–326. Springer, 2008.
- [122] Michael Schroeder. How to tell a logical story. In *AAAI Fall Symposium*, 1999.
- [123] Elisa Shernoff, Stacy Frazier, Christine Lisetti, Cedric Buche, Stephanie Lunn, Claire Brown, Alban Delmarre, Tommy Chou, Joseph Gabbard, and Emily Morgan. Early career teacher professional development : Bridging simulation technology with evidence-based behavior management. *Journal of Technology and Teacher Education*, 26(2) :299–326, April 2018.
- [124] Elisa S Shernoff, Katherine Von Schalscha, Joseph L Gabbard, Alban Delmarre, Stacy L Frazier, Cedric Buche, and Christine Lisetti. Evaluating the usability and instructional design quality of interactive virtual training for teachers (ivt-t). *Educational Technology Research and Development*, pages 1–28, 2020.
- [125] Paul Skalski, Ron Tamborini, Ed Glazer, and Sandi Smith. Effects of Humor on Presence and Recall of Persuasive Messages. *Communication Quarterly*, 57(2) :136–153, May 2009.
- [126] Mel Slater, Beau Lotto, Maria Marta Arnold, and Maria V Sanchez-Vives. How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología*, 40(2) :193–210, 2009.

- [127] Gillian Slessor, Ailbhe Finnerty, Jessika Papp, Daniel T. Smith, and Douglas Martin. Gaze-cueing and endogenous attention operate in parallel. *Acta Psychologica*, 192 :172–180, January 2019.
- [128] Rébaï Soret, Pom Charras, Christophe Hurter, and Vsevolod Peysakhovich. Attentional orienting in virtual reality using endogenous and exogenous cues in auditory and visual modalities. In *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '19, pages 1–8, New York, NY, USA, June 2019. Association for Computing Machinery.
- [129] Naoyuki Tamura. User’s guide of a linear logic theorem prover (llprover). Technical report, Kobe University, Japan, 1998.
- [130] Michael Thielscher. *Challenges for action theories*. Springer, 2000.
- [131] Tom Trabasso and Linda L Sperry. Causal relatedness and importance of story events. *Journal of Memory and Language*, 24(5) :595 – 611, 1985.
- [132] Tom Trabasso and Paul van den Broek. Causal thinking and the representation of narrative events. *Journal of Memory and Language*, 24(5) :612 – 630, 1985.
- [133] Alessandro Valitutti, Hannu Toivonen, Antoine Doucet, and Jukka M. Toivanen. “Let everything turn well in your wife” : Generation of adult humor using lexical constraints. In *Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, volume 2, page 243–248. Association for Computational Linguistics, 8 2013.
- [134] Susan W. van den Braak, Herre van Oostendorp, Henry Prakken, and Gerard A. W. Vreeswijk. Representing narrative and testimonial knowledge in sense-making software for crime analysis. In *Proceedings of the 2008 Conference on Legal Knowledge and Information Systems*, pages 160–169. IOS Press, 2008.
- [135] Helene S Wallach, Marilyn P Safir, and Margalit Bar-Zvi. Virtual reality cognitive behavior therapy for public speaking anxiety : a randomized clinical trial. *Behavior modification*, 33(3) :314–338, 2009.
- [136] Nathan Walter, Michael J Cody, Larry Zhiming Xu, and Sheila T Murphy. A Priest, a Rabbi, and a Minister Walk into a Bar : A Meta-Analysis of Humor Effects on Persuasion. *Human Communication Research*, 44(4) :343–373, October 2018.
- [137] Sara K. Yeo and Meaghan McKasy. Emotion and humor as misinformation antidotes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(15) :e2002484118, April 2021. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- [138] R. Michael Young. Notes on the Use of Plan Structures in the Creation of Interactive Plot. In *Narrative Intelligence : Papers from the AAI Fall Symposium*. AAI Press, 1999.