

La cybernétique

Dans la continuité des travaux précédents, notre objectif ici est de poursuivre les développements de la méthode hCWA et de proposer des outils méthodologiques destinés à modéliser les trajectoires des opérateurs au sein de l'espace de travail délimité par les contraintes liées au soin, à la gestion des tâches et au traitement de l'information. En effet, et comme l'exposent Cook & Rasmussen (2005), la question de la modélisation du point opératif et de ses trajectoires au regard des contraintes constitue un enjeu majeur pour aller plus dans l'exploitation du modèle dynamique de sûreté de Rasmussen (1997). Toute la difficulté est d'appliquer ce modèle à des systèmes faiblement couplés, comme peut constituer une équipe de soignants en situation d'urgence médicale.

Dans ce chapitre nous proposerons la méthode « SSS : State Space Sketch » comme un outil de modélisation permettant de représenter comment les opérateurs gèrent les nombreux degrés de liberté pour assurer le contrôle des contraintes. Au sein des systèmes faiblement couplés, les degrés de liberté sont nombreux et proviennent à la fois du domaine, de l'organisation et de l'interaction des opérateurs entre eux et avec leur environnement. Aussi, auto-organisation et adaptation en temps réel sont indispensables pour assurer la sécurité et contrôler les événements inattendus qui émergent de l'interaction de ces différents composants. Dans ce contexte, l'ensemble des actions possibles est conséquent et plusieurs trajectoires sont envisageables pour atteindre un même objectif. Comprendre comment les opérateurs s'adaptent et naviguent dans un champ de possibles aussi large est indispensable pour construire des environnements de soin sûrs qui soutiennent les comportements adaptatifs.

Sur la base des principes fondamentaux de la cybernétique, qui offrent un cadre théorique permettant de modéliser le comportement des systèmes complexes sous forme de trajectoires, le modèle SSS tente de mettre en évidence la variabilité du système (i.e. l'ensemble des trajectoires possibles) et tente de mettre en lumière des comportements à risques qui y sont associés et qui nécessitent une compréhension plus approfondie. L'objectif final étant de comprendre comment les opérateurs s'adaptent aux contraintes et à leurs pressions (contrainte liée au domaine de travail SP, contraintes liées à l'organisation du travail GT et TI), afin de développer des assistances adaptées à la complexité du système de l'urgence médicale. Le processus de modélisation engagé est ici cyclique. Le modèle initial permet de lire et comprendre les données, l'analyse extraite des données permet, en retour, de spécifier et d'enrichir le modèle.

La première partie sera consacrée à une brève présentation des principes fondamentaux cybernétiques développés par R. Ashby, ces derniers servant de base au développement de notre modèle. Les principes méthodologiques de SSS seront ensuite exposés et appliqués à l'analyse de 6 vidéos mettant en scène des équipes médicales devant faire face à une urgence pédiatrique en contexte de simulation.

Dès lors que l'on aborde la question de la complexité des systèmes, la cybernétique apparaît comme un champ scientifique pertinent et adapté. Dans son ouvrage « Une introduction à la cybernétique », Ashby (1957) défend l'idée que les principes fondamentaux de la cybernétique peuvent être dissociés des grandes sciences telles que les mathématiques ou l'électronique et peuvent être abordés d'une façon simple et accessible à tous. La cybernétique offre un cadre de compréhension et d'analyse des systèmes larges et complexes et se définit comme une science de nature fonctionnelle. En effet elle s'intéresse, non pas aux choses, mais à la façon dont elles se comportent. Tout comme les méthodes formatives destinées à comprendre comment le travail peut être potentiellement effectué, la cybernétique tente de comprendre le champ des comportements possibles des systèmes et propose des outils pour les modéliser sous forme de trajectoires.

Une des lois fondamentales de la cybernétique repose sur la *variabilité requise*. Cette loi énonce que seule la variété peut contrôler la variété (p207). La « variété » étant définie par Ashby comme les entités distinguables dans un ensemble d'éléments, autrement dit le dénombrement en quantité des comportements et des différents états pour un système donné. Ainsi, face à un système complexe S1, le contrôle et la régulation de S1 par S2 ne sont possibles que si la variété de S2 est au moins égale à la variété de S1. Un régulateur S2 (dans notre cas l'organisation de travail) doit faire preuve de variabilité, de flexibilité pour pouvoir s'adapter et faire face à l'incertitude et la complexité de S1 (dans notre cas le domaine de travail).

Plusieurs grands concepts constituent les fondements de la cybernétique telle qu'elle est appréhendée par R. Ashby. Nous présenterons ceux qui nous ont inspiré pour développer la méthode de modélisation de l'activité que nous proposons dans ce travail de thèse :

Un état et ses variables essentielles : Dans le cadre de la cybernétique, Ashby définit les états du système comme des conditions explicitement définies ou des propriétés reconnaissables lorsqu'elles se produisent. Tout système possède, par nature, de nombreux états possibles. Un état se définit en termes de variables essentielles (p197). Pour un organisme vivant, les variables essentielles sont les variables fondamentales qu'il faut maintenir dans des limites physiologiques acceptables pour que l'organisme reste en vie. Pour une entreprise, une des variables essentielles à sa survie serait par exemple le maintien d'une plus-value.

Une transition : Pour aborder le concept de la transition, Ashby utilise l'exemple du changement de couleur de la peau sous l'effet du soleil, c'est-à-dire la transition de la *peau pâle* vers la *peau bronzée*. Dans cette situation, un état (i.e. la peau pâle) est influencé par un facteur (i.e. le soleil) et se change en un autre état (i.e. la peau bronzée). Ce changement, depuis la peau pâle vers la peau bronzée, représente

une transition. La transition est alors caractérisée par deux états et une indication permettant de spécifier quel état est modifié en quoi : peau pâle → peau bronzée.

Une transformation : Sur la base de l'exemple précédent, il est possible de comprendre que le facteur « soleil » ne joue pas uniquement sur la couleur de la peau. En effet, il peut générer des transitions sur d'autres objets. Par exemple, le facteur *soleil* peut permettre une transition de l'état solide à l'état liquide (glaçon → eau) ou encore de l'état froid à l'état chaud (sol froid → sol chaud). Ainsi, un même facteur peut générer un ensemble de transitions sur différents objets. Cet ensemble de transition est appelé une transformation.

Une matrice de transformation : Une transformation est donc un ensemble de transitions que génère un facteur. Dans le cadre de la cybernétique, une telle transformation est représentée sous la forme d'une matrice composée des états initiaux en colonne et des états finaux en ligne. Les cellules sont marquées du signe « + » lorsqu'une transition se produit depuis un état initial vers un état final. L'indicateur « 0 » est utilisé lorsqu'aucune transition n'a lieu. Pour illustrer ce concept, reprenons l'ensemble des exemples évoqués précédemment concernant le facteur *soleil*, à savoir les transitions peau pâle → peau bronzée ; eau → glace ; sol froid → sol chaud. La matrice de transformation du soleil peut alors être représentée de la façon suivante :

↓	Peau Pâle	Glace	Sol froid
Peau bronzée	+	0	0
Eau	0	+	0
Sol chaud	0	0	+

La flèche « ↓ » indique le sens des transitions, les « + » mettent en évidence la présence d'une transition, les « 0 » l'absence de transition. La matrice de transformation fournit donc un ensemble d'états initiaux et une indication concernant ce en quoi ces états initiaux sont transformés (i.e. les états finaux) et permet de dire que sous l'effet du soleil, l'état *peau pâle* évoluera vers un état *peau bronzée*, l'état *glace* évoluera vers l'état *eau* et l'état *sol froid* évoluera vers un état *sol chaud*.

D'une façon plus générale, et indépendamment du facteur à l'origine de la transformation, considérons maintenant la matrice de transformation suivante :

↓	O	P	Q	R	S	T
P	0	0	0	0	+	0
Q	0	+	0	0	0	0
R	+	0	0	0	0	0
S	0	0	0	+	0	0
T	0	0	+	0	0	0
U	0	0	0	0	0	+

À nouveau, la flèche « ↓ » indique le sens des transitions, les « + » mettent en évidence la présence d'une transition, les « 0 » l'absence de transition. Cette matrice de transformation, que nous nommons T, met en relation des états initiaux {O, P, Q, R, S, T}, des états transformés {P, Q, R, S, T, U} et indique

que, sous l'effet de cette transformation, l'état O évolue vers l'état R, l'état P évolue vers l'état Q, l'état Q évolue vers l'état T, etc... Sur la base de cette matrice de transformation, les transitions de passage d'un état à un autre sont connues. Ainsi, à partir de l'état O, et après avoir appliqué la matrice de transformation, le système évolue de la façon suivante : $O \rightarrow R \rightarrow S \rightarrow P \rightarrow Q \rightarrow T \rightarrow U$. À partir de l'état S, le système évolue de la façon suivante : $S \rightarrow P \rightarrow Q \rightarrow T \rightarrow U$. Cette nouvelle séquence d'état, générée à la suite de l'application de la matrice de transformation définit une ligne comportementale ou une trajectoire. Ainsi, lorsqu'on connaît la matrice de transformation on connaît la trajectoire du système ou bien l'ensemble des trajectoires possibles dans le cas où un état peut conduire à plusieurs états différents.

Une trajectoire : Une fois la transformation réalisée, la nouvelle séquence d'état générée définit une ou plusieurs trajectoires, c'est-à-dire la « ligne comportementale du système » pour reprendre l'expression utilisée par Ashby.

La notion de stabilité vs. instabilité : La stabilité est souvent associée à la notion d'équilibre. Lorsque l'état initial est inchangé à la suite d'une transformation, on parle d'état d'équilibre. La trajectoire boucle sur un même état. Dans le cadre d'une matrice au sein de laquelle les opérants et transformés sont identiques (avec n colonnes, m lignes et $n = m$), ces états d'équilibres se retrouvent le long de la diagonale de la matrice. Malgré le fait que la stabilité soit un terme couramment utilisé et associé à la performance, Ashby défend l'idée que la stabilité peut être indésirable dès lors qu'elle boucle sur un état indésirable (p81).

Ensemble de possibilités : En termes généraux, l'ensemble des possibilités représente l'ensemble des événements, des actions, des situations qui sont possibles compte tenu du problème, de l'objectif à atteindre et du contexte. Au sein de la matrice de transformations, toutes les cellules représentent les combinaisons totales et les cellules marquées d'un « + » représentent l'ensemble des possibilités en termes de transitions d'un état à un autre.

Contrainte : Dans les termes d'Ashby, au moins une contrainte existe lorsque les combinaisons possibles sont inférieures aux nombres de combinaisons totales. Autrement dit, lorsque le nombre de cellules marquées par un « + » au sein de la matrice de transformation est inférieur au nombre de combinaison totale (i.e. le nombre total de cellule). De cette façon, une contrainte est considérée comme un facteur limitant des possibilités d'actions, réduisant ainsi les degrés de liberté. L'absence de contrainte serait modélisée par une matrice de transformation où chaque cellule serait dotée d'un « + », autrement dit où toutes les transitions seraient possibles.

Exemple

Tentons d'appliquer les notions précédentes. Imaginons un feu tricolore composé de 3 états que nous nommerons V, O, R en relation à leurs couleurs respectives « Vert », « Orange », « Rouge ». De par la présence de ces 3 éléments clairement distinguables, la variété est ici de 3. Sur la base de ces 3 éléments, la matrice de transition identifie 9 combinaisons possibles. Néanmoins, dans les faits, seules trois

combinaisons sont utilisées et les transitions ne sont possibles que depuis l'état Vert vers l'état Orange, depuis l'état Orange vers l'état Rouge et depuis l'état Rouge vers l'état Vert. La figure 26 ci-dessous illustre, sous la forme d'une matrice de transformation, les combinaisons et transitions possibles lors du fonctionnement réel du feu tricolore.

↓	V	O	R
V	0	0	+
O	+	0	0
R	0	+	0

Figure 26 : Matrice de transformation d'un feu tricolore.

Cette matrice met en évidence l'ensemble des transitions autorisées. Le feu suit la trajectoire cyclique Vert → Orange → Rouge. Les transitions Orange → Vert ou Rouge → Orange étant impossibles.

Seules 3 combinaisons sont réellement utilisées sur les 9 possibilités disponibles. En termes cybernétiques, cette réduction des possibilités indique la présence de contraintes. Ces contraintes réduisent les degrés de liberté de 9 à 3 et forgent la seule trajectoire possible d'une couleur de feu à une autre, à savoir : Vert → Orange ; Orange → Rouge ; Rouge → Vert. Le mode de fonctionnement d'un feu tricolore est fortement contraint. Il n'existe pas d'alternatives possibles aux transitions entre couleurs que nous venons de décrire. Pour chaque état, un seul degré de liberté est disponible et en conséquence, une seule trajectoire est envisageable ; une situation qui correspond dans le monde du travail au suivi d'une procédure pas à pas. A l'inverse, un système faiblement couplé, comme le traitement d'une urgence médicale par une équipe de soignants, offre un nombre de degrés de liberté et donc de trajectoires alternatives particulièrement élevé.

Sur la base de ces concepts fondamentaux de la cybernétique, nous proposons de développer une méthode d'analyse destinée à modéliser les comportements des opérateurs sous forme de trajectoires dans un espace de travail contraint définissant un nombre plus ou moins important de degrés de liberté. L'objectif étant de représenter l'activité réelle observée lors des sessions de simulation en termes d'états, de transitions et de matrices de transformation. Via cet exercice de modélisation, nous souhaitons (i) rendre compte de la variabilité du système (i.e. l'ensemble des DDL disponibles pour faire face à complexité de la situation), (ii) comprendre comment les opérateurs contrôlent ces DDL et naviguent au sein de DSM et (iii) mettre en lumière des situations problématiques qui nécessiteraient le développement d'assistances destinées à améliorer la sécurité et la performance des systèmes.

III. Présentation de la méthode SSS

SSS : The State Space Sketch

La présence de nombreux degrés de liberté dans un système faiblement couplé entre le domaine de travail et l'organisation complexifie le contrôle d'une trajectoire dans l'espace de travail qui puisse être sûre. Dans ce contexte, les comportements planifiés ne peuvent être basés que sur des repères partiels, ces repères ayant la particularité d'être essentiels à la performance. En situation, des procédures strictes ne sont pas applicables à la lettre. Des états inattendus ou incertains émergeront des interactions in situ entre le domaine de travail et l'organisation. Ce phénomène a été démontré dans des études concernant la planification de missions dans une zone ennemie par des pilotes de chasse (Amalberti & Deblon 1992) et dans des études sur la planification de l'anesthésie où les points à considérer (états critiques) sont particulièrement mis en évidence par les anesthésistes comme des mesures préventives alors que de nombreux degrés de liberté restent ouverts dans la prévision du déroulement du travail (Xiao et al. 1997). Le défi est d'être en mesure de modéliser les degrés de liberté auxquels les opérateurs doivent faire face dans des systèmes de travail faiblement contraints (Morineau & Flach 2019). Dans ce contexte, nous proposons la méthode, appelée « *The State Space Sketch* » (SSS), destinée à modéliser les comportements comme des transitions dans un espace d'état. Les différentes étapes méthodologiques ont pour objectif de décrire les contraintes et l'ensemble des degrés de liberté que les opérateurs doivent considérer pour progresser de manière sûre et efficace dans l'espace de travail.

1. Le processus de modélisation

L'exercice de modélisation permet la construction d'une représentation abstraite d'une réalité concrète. Comme l'écrit Daniel Durand dans son ouvrage sur *La Systémique*, cette représentation doit être assez simplifiée pour être intelligible mais suffisamment fidèle pour être utile et fiable (p.60). Nous présenterons ici le processus de modélisation que nous mettons en œuvre, le but, les éléments du modèle ainsi que les différentes étapes méthodologiques à respecter afin d'aboutir à une compréhension approfondie du système étudié.

a) But de la modélisation

L'effort de modélisation repose ici sur le développement d'outils de modélisation permettant de comprendre comment les opérateurs contrôlent les contraintes et les nombreux degrés de libertés disponibles au sein des systèmes faiblement couplés. En effet, au sein de ces systèmes, l'espace des possibles est large et plusieurs solutions sont possibles pour atteindre un même objectif. Ainsi, en

localisant le point opératif au sein de DSM et en modélisant les comportements des opérateurs comme des trajectoires nous pourrions comprendre comment les opérateurs s'adaptent face aux nombreux degrés de libertés disponibles et assurent le contrôle des contraintes. L'objectif à long terme étant de développer des assistances qui soutiennent les comportements adaptatifs nécessaires pour assurer les exigences de sécurité et performance.

b) Les éléments du modèle

Les contraintes : Les contraintes identifiées sur la base du modèle DSM délimitent l'espace des opérations sûres au sein duquel les opérateurs peuvent naviguer. Cet espace représente l'ensemble des possibilités, autrement dit les degrés de liberté disponibles pour assurer le contrôle des contraintes. Les comportements orientés vers le contrôle des contraintes sont modélisés sous forme de trajectoire au sein de cet espace.

Les états : Les états représentent les étapes critiques dans la réalisation de la tâche (e.g. checkpoints) par lesquelles les opérateurs doivent transiter pour contrôler une situation d'urgence. Un état peut être atteint ou non atteint. Le passage d'un état à un autre représente une transition. Une succession de transition entre états forme une trajectoire. Les états sont représentés graphiquement par des cercles.

Les variables : Chaque état est caractérisé par une liste de variables. Ces variables représentent les opérations à réaliser pour atteindre l'état.

Les liens de dépendance fonctionnelle : Un lien de dépendance fonctionnelle entre deux états implique un prérequis dans la réalisation de l'action. Si deux états E_x et E_y partagent un lien de dépendance fonctionnelle, la réalisation de l'état E_y n'est possible que si l'état E_x a préalablement été réalisé. A l'inverse, si l'état E_x n'est pas atteint, alors des difficultés sont à prévoir dans la réalisation de l'état E_y . Un même état peut partager des liens de dépendances avec plusieurs états. Un état peut ne pas avoir de lien de dépendance fonctionnelle. On dit alors qu'il est volant et sa réalisation peut se faire à n'importe quel moment dans la tâche. Plus il y a de liens de dépendance, plus les degrés de libertés pour réaliser la tâche sont faibles. Moins il y a de lien de dépendance, plus les degrés de libertés pour réaliser la tâche sont nombreux. Les liens de dépendance sont représentés graphiquement par des flèches à sens unique dont la pointe indique l'état dont la réalisation est dépendante du précédent.

Les matrices de transformation : Deux types de matrices de transformations sont utilisées. Une première matrice dite « matrice calque » est développée lors de la phase de création du modèle. Une seconde matrice dite « matrice d'analyse » est issue de la phase d'analyse des comportements. Ces deux matrices réduisent le modèle SSS sous la forme d'une matrice carrée d'ordre n où n correspond au nombre d'états identifiés. Alors que la matrice calque représente l'ensemble des transitions possibles entre états et illustre l'espace au sein duquel les opérateurs humains peuvent naviguer pour assurer le contrôle de la situation, la matrice d'analyse met en évidence l'ensemble des transitions réelles

observées. La matrice d'analyse rend compte de l'effet des contraintes liées à la mise en œuvre effective, en contexte, des opérations comparativement à la matrice calque. Lors de la première phase pré-analytique destinée à la création du modèle, chaque cellule de la matrice calque est colorée (vert, orange ou rouge) en fonction du caractère normal, anormal ou interdit de la transition en question. Par exemple, si un lien de dépendance fonctionnelle existe entre les états E_1 et E_2 , cela signifie que l'état 2 ne peut être réalisé avant l'état 1. La cellule $E_1 \rightarrow E_2$ sera colorée en vert (i.e. la transition est normale et attendue) tandis que la cellule $E_2 \rightarrow E_1$ sera colorée en rouge (i.e. la transition est interdite d'un point de vue fonctionnel). En qualifiant chaque cellule, la matrice calque rend compte des zones à risques potentielles dans la navigation entre les états sur la base de l'analyse de la tâche. Lors de la seconde étape d'analyse des données, chaque cellule de la matrice d'analyse est caractérisée par un chiffre représentant la somme des transitions observées pour la cellule concernée. La probabilité de passage d'un état colonne à un état ligne est ensuite calculée. En superposant les deux matrices, la matrice de transformation finale met en lumière les comportements à risques qui nécessitent une analyse qualitative plus approfondie (i.e. ceux situés dans les zones qualifiées de zones à risques).

2. Les étapes méthodologiques

Deux grandes phases méthodologiques se distinguent : une première phase destinée à construire le modèle de la tâche ; une seconde phase destinée à analyser les données propres à l'étude. Nous rappelons que la méthodologie engage un processus cyclique où le modèle initial sert de grille de lecture pour comprendre et analyser les données réelles et les résultats issus de l'analyse permettent en retour, de spécifier certaines caractéristiques du modèle (Figure 27).

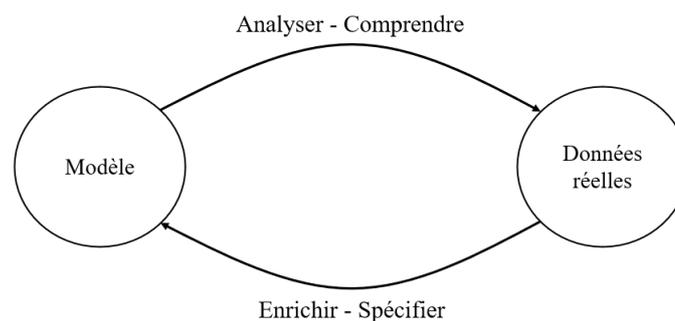


Figure 27 : Représentation du cycle propre au processus méthodologique.

Le modèle permet de comprendre les données issues du terrain. Les résultats issus de l'analyse permettent d'enrichir et spécifier le modèle.

Chaque phase méthodologique est caractérisée par une succession d'étapes que nous détaillerons ultérieurement (Figure 28) :

- a) Création du modèle
 - i. Identification des états critiques de la tâche et des variables propres à chaque état

- ii. Caractérisation des états au regard des contraintes
 - iii. Classification des états selon une dimension séquentielle de réalisation de la tâche
 - iv. Identification des liens de dépendances entre les états
 - v. Construction de la matrice calque et identification des zones de risques potentiels dans la navigation
- b) Analyse des données
- vi. Remplissage de la matrice d'analyse
 - vii. Analyse et interprétation des données

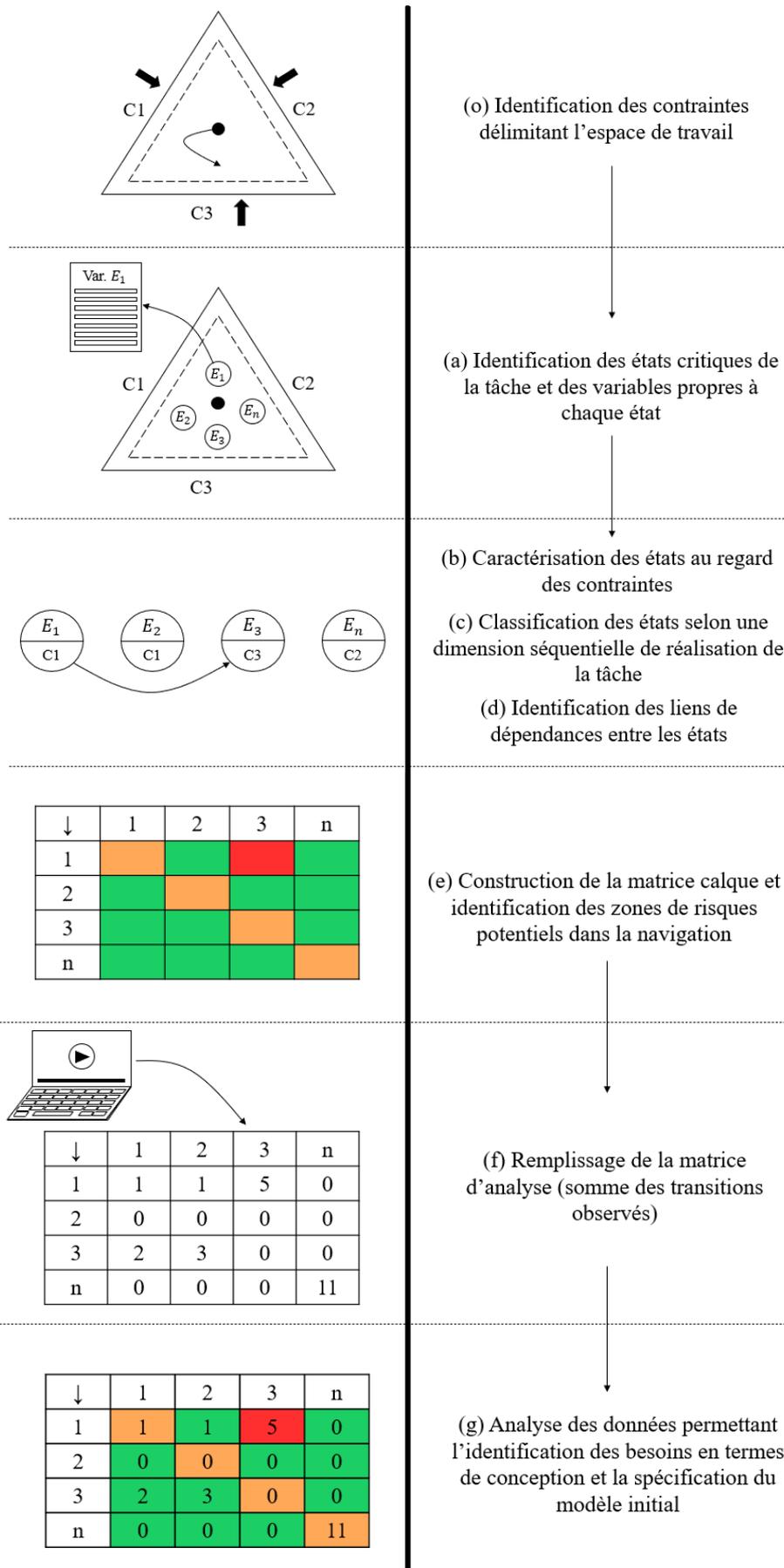


Figure 28 : Organigramme du processus de modélisation de la méthode SSS

a) Phase méthodologique 1 : Création du modèle

i. Identification des états critiques de la tâche et des variables propres à chaque état

Face au nombre important de degrés de liberté présents, les opérateurs utilisent la structure de la tâche comme un outil pour guider leurs trajectoires au sein de leur espace de travail. L'activité est structurée dans le temps par une séquence d'états à réaliser et cette structure permet aux opérateurs de geler les degrés de liberté qui ne semblent pas pertinents pour atteindre les objectifs de la tâche. Ces états peuvent être spécifiés à différents niveaux de granularité et un niveau plus ou moins fin de description peut être approprié. Nous considérerons que le bon niveau de description est celui qui met en évidence les états critiques qui doivent être contrôlés par un système d'assistance ou par les opérateurs eux-mêmes afin d'éviter les risques. L'analyse de documents techniques, les procédures, les connaissances d'experts et les observations peuvent être utilisées pour identifier l'ensemble des états critiques de la tâche. La sélection de ces états peut également dépendre du profil des opérateurs et des conditions de travail. Par exemple, le contrôle effectué par un opérateur novice ou fatigué nécessitera plus de points d'étape que pour un expert ou un opérateur éveillé (Sebillotte 1991). Le niveau de complexité et de criticité de la séquence des tâches nécessitera également plus ou moins de points de contrôle.

En tant que checkpoints, les états doivent, de préférence, être formulés sous la forme de verbes au participe passé. Ces états ne sont pas des actions ou des objectifs comme c'est généralement le cas dans les méthodes classiques d'analyse de la tâche, telles que l'analyse cognitive appliquée des tâches (ACTA) (Militello & Hutton 1998) ou l'analyse hiérarchique des tâches (HTA) (Shepherd 1998). Il s'agit ici d'états qui impliquent à la fois des opérations et des objectifs mais qui pourraient être identifiés par un observateur ou par des capteurs chargés de suivre l'activité. Cette focalisation sur les états de la tâche atteints ou non atteints facilite le développement potentiel de systèmes d'assistance impliquant, par exemple, le déclenchement d'alarmes ou la présence de checklists qui contrôlent l'état de l'environnement de travail.

Un état donné est considéré comme atteint si les opérations requises pour l'atteindre sont satisfaites. Comme l'indique Ashby dans son ouvrage, un état se définit en termes de variables essentielles. Ainsi chaque état est caractérisé par une liste de variables indiquant les opérations nécessaires à l'atteinte de l'état. À titre d'exemple, dans une situation d'urgence nécessitant un remplissage¹⁴ vasculaire, les variables nécessaires à l'atteinte de l'état seraient « Prescrire les drogues » ; « Calculer les dosages » ; « Remplir le patient ». La sélection des variables s'effectue également sur la base de documents techniques, de procédures, des connaissances d'experts et repose sur le même principe que l'identification des contraintes et des états. Le processus est dit récursif. Les contraintes sont les contraintes nécessaires et suffisantes au contrôle du système, les états sont les états nécessaires et

¹⁴ Le remplissage vasculaire est une technique médicale permettant un apport liquidien par voie veineuse. L'effet du remplissage est d'augmenter le retour veineux et donc d'augmenter le débit cardiaque. Le choix du soluté de remplissage se fait entre les cristalloïdes et les colloïdes (Rabechault & Bart 2015).

suffisants au contrôle des contraintes, les variables sont les variables nécessaires et suffisantes à l'atteinte des états. Notons qu'à nouveau, le niveau de granularité est dépendant des objectifs de l'analyse, des caractéristiques des soignants, du contexte. L'objectif étant de trouver le bon compromis « fidélité – pertinence ».

ii. Caractérisation des états au regard des contraintes

Afin de localiser l'état de la tâche dans l'espace de travail délimité par DSM, chaque état est caractérisé au regard de la contrainte principale que ce dernier permet de contrôler. Ainsi, un état caractérisé « SP » correspond à un point d'étape orienté vers le contrôle de la contrainte de soin au patient. Un état « TI » met en évidence un point d'étape orienté vers le contrôle de la contrainte de traitement de l'information. Un état caractérisé « GT » est un état dont la réalisation repose sur des comportements orientés vers le contrôle de la contrainte de gestion des tâches. Notons ici que chaque état possède une coordonnée sur chacune des dimensions du modèle mais que seule la contrainte principale est utilisée pour caractériser l'état. Dans une logique de sécurité, ce choix repose sur la notion de criticité. En effet, pour un état donné, si le risque de ne pas atteindre l'état est principalement lié à de l'information (e.g. mauvaise communication, perte d'information, incompréhension, erreur de traitement...) alors l'état sera caractérisé TI. S'il est lié à de la connaissance ou de la technique médicale (e.g. absence de soin approprié, non-respect des procédures, erreur d'injection, massage ou intubation non efficace...) alors il sera caractérisé SP. Pour finir, si le risque est lié au fonctionnement ou à la manipulation d'un outil alors cet état sera identifié GT (e.g. outil défaillant, outil non branché, outil non accessible...).

iii. Classification des états selon une dimension séquentielle de réalisation de la tâche

Une première dimension séquentielle permet d'ordonner les états selon l'ordre dans lequel ils sont censés être réalisés compte tenu de la tâche. Pour un état donné E_n , l'état E_{n-1} est réalisé avant, l'état E_{n+1} est réalisé après. La numérotation des états de E_1 à E_{fin} illustre cette dimension séquentielle. Graphiquement, un état situé à gauche d'un état cible est réalisé avant. Un état positionné à droite d'un état cible est réalisé après. Cet ordre est préétabli sur la base des procédures médicales et des avis des experts. Par exemple, pour une tâche quotidienne telle que « s'asseoir au bureau », trois états peuvent être identifiés : « E_1 : porte ouverte » ; « E_2 : manteau enlevé » ; « E_{fin} : assis sur la chaise ». Ces états suivent un ordre de progression logique dans la réalisation de la tâche. Toutefois, compte tenu du fait que nous étudions un système faiblement couplé, il s'agit d'appréhender une telle séquence procédurale comme un repère dans le suivi de l'activité et non comme une trajectoire à suivre par les opérateurs, de manière obligatoire.

iv. Identification des liens de dépendances entre les états

En plus de la dimension séquentielle, les états sont ordonnés sur la base des liens de dépendance fonctionnelle qu'ils partagent. Un lien de dépendance entre deux états indique que l'atteinte d'un état E_n est dépendante de l'atteinte d'un état précédent. Sur la base de l'exemple précédent, nous comprenons que l'opérateur ne peut s'asseoir à sa place sans avoir préalablement ouvert la porte. Si l'opérateur ne parvient pas à ouvrir la porte, cela aura un impact significatif sur la possibilité d'être assis sur la chaise. Il existe donc un lien de dépendance fonctionnelle entre ces deux états. À l'inverse, et même si l'état « E_2 : manteau enlevé » est positionné avant l'état « E_{fin} : assis sur la chaise » dans la séquence de réalisation de la tâche, l'opérateur peut, dans certaines situations, s'asseoir avec son blouson. Le fait de ne pas enlever le manteau n'a pas d'incidence sur la capacité de l'opérateur à s'asseoir au bureau. Ainsi, ces deux états ne partagent aucun lien de dépendance fonctionnelle. L'état E_2 étant considéré comme un état volant, autrement dit un état dont la réalisation est nécessaire mais peut s'effectuer à différents moments dans le processus de progression dans la tâche.

Ce type de dépendance peut être formellement décrit par l'implication logique inverse dans la logique propositionnelle (Tableau 10). Considérons deux états E_1 et E_2 . Si une dépendance fonctionnelle existe entre E_1 et E_2 , et que E_1 n'est pas atteint, alors E_2 ne peut pas être atteint correctement. Cependant, notons que E_2 peut ne pas être atteint en raison d'autres événements ou problèmes même si E_1 a préalablement été atteint.

Tableau 10 : Tableau de vérité de la relation de dépendance fonctionnelle entre deux états E1 et E2 sur la base de l'implication logique inverse.

État 1	État 2	Valeur de vérité	Interprétation
Atteint	Atteint	Vrai	Absence de problème, les états 1 et 2 sont correctement atteints.
Non atteint	Atteint	Faux	La situation est impossible. Du fait du lien de dépendance unissant les deux états, E2 ne peut être atteint si E1 n'a préalablement pas été atteint. L'échec en E1 impacte la réalisation de E2.
Atteint	Non atteint	Vrai	L'état 2 est non atteint malgré des actions correctes menées sur E1. Peut provenir d'un dysfonctionnement ou d'actions incorrectes sur E2 et/ou sur d'autres états que E1.
Non atteint	Non atteint	Vrai	La « non atteinte » de l'état 1 se propage à l'état 2 du fait du lien de dépendance unissant ces deux états.

v. Construction de la matrice calque et identification des zones de risques potentiels dans la navigation

Sur la base des états et des liens de dépendances identifiés dans le modèle SSS, une matrice est construite. Le nombre de lignes et de colonnes est lié au nombre d'états critiques identifiés dans le modèle. À titre d'exemple, un modèle composé de 10 états critiques sera réduit sous la forme d'une matrice carrée d'ordre 10 (i.e. 10 colonnes et 10 lignes).

La lecture de la matrice s'effectue depuis les colonnes vers les lignes. Le sens de la flèche « ↓ » permet de caractériser le sens de la lecture. Les états initiaux sont classés en colonne tandis que les états finaux ou états cibles sont positionnés en ligne. Chaque cellule représente une transition d'un état à un autre, autrement dit le passage d'un état colonne à un état ligne. L'ordre de classification des états au sein de la matrice est le même pour les colonnes et les lignes. Il respecte la dimension séquentielle de la tâche établie préalablement.

La matrice vide représente l'ensemble des possibilités d'action, autrement dit l'ensemble des degrés de liberté disponibles pour faire face à la situation. Par exemple, pour le même modèle SSS composé de 10 états, la matrice sera composée de 100 cellules. Ces 100 cellules sont représentatives de l'ensemble des transitions possibles entre les différents états identifiés.

Plusieurs zones sont identifiables dans la matrice. Premièrement, la diagonale sépare la matrice en deux parties symétriques, une partie basse située en dessous de la diagonale et une partie haute située au-dessus. La partie basse représente des transitions qui suivent la séquence de la tâche préalablement établie, autrement dit une progression dans la tâche vers l'avant. À l'inverse, la partie haute illustre des transitions dans le sens inverse de la séquence de la tâche. Ces transitions sont considérées comme des retours en arrière dans la progression de la tâche. Ces retours en arrière peuvent être pertinents dans certains cas comme lors d'une action de vérification, ou signaler un problème nécessitant un retour en arrière du fait de la non réalisation d'un prérequis. Deuxièmement, les cellules constituant la diagonale sont caractéristiques des comportements qui bouclent sur un même état. Lors de cette transition, l'état cible reste identique à l'état initial. Ces comportements peuvent être le signe que l'opérateur vérifie chacune des variables essentielles de l'état de façon itérative, ou mettre en évidence un problème empêchant les opérateurs de progresser dans la tâche.

Afin de distinguer ce qui relève de la vérification ou du problème chaque cellule de la matrice est caractérisée par une couleur verte, orange ou rouge en fonction du risque potentiel que représente la transition concernée. Une cellule verte illustre une transition normale, attendue et non risquée. Une cellule orange représente une transition anormale, inattendue pouvant induire des risques. Une cellule rouge met en évidence une transition interdite, fonctionnellement impossible. La caractérisation des couleurs de la matrice se base sur le modèle SSS et les liens de dépendances fonctionnelles

préalablement identifiés. À titre d'exemple, et concernant la tâche quotidienne « s'asseoir au bureau », la figure 29 illustre la caractérisation des cellules de la matrice sur la base du modèle SSS.

Une fois complétée, la matrice calque sert de grille de lecture pour caractériser les comportements observés et identifier les transitions nécessitant une analyse/compréhension plus approfondie. Il est important de noter que plusieurs calques peuvent être mis en place en fonction des objectifs de l'analyse. Un premier calque « fonctionnel » met en évidence les contraintes fonctionnelles dans la réalisation des actions. La caractérisation des cellules illustre les possibilités d'actions, en termes de comportements moteurs. Un second calque « cognitif » met en évidence l'espace-problème au sein duquel les opérateurs naviguent. Apparaissent au sein de cette matrice les processus cognitifs de raisonnement ou de résolution de problème. À titre d'exemple, les comportements mettant en évidence un « retour en arrière » dans la progression de la tâche (i.e. partie haute située au-dessus de la diagonale) peuvent être problématiques au sein de la matrice fonctionnelle tandis qu'ils représentent des processus mentaux de vérification ou de surveillance au sein de la matrice cognitive.

↓	E_1 (Porte ouverte)	E_2 (Blouson enlevé)	E_3 (Assis)
E_1 (Porte ouverte)	Boucle sur le même état. (Risque potentiel lié à l'ouverture (e.g. pas de clés, serrure cassée...)).	Retour en arrière. (L'opérateur enlève son blouson avant d'ouvrir la porte).	Transition impossible. (L'opérateur ne peut s'asseoir sans avoir ouvert la porte).
E_2 (Blouson enlevé)	Progression normale dans la tâche.	Boucle sur le même état. (Risque potentiel lié au blouson (e.g. fermeture cassée...)).	Retour en arrière. (L'opérateur enlève son blouson une fois assis).
E_3 (Assis)	Progression normale dans la tâche.	Progression normale dans la tâche.	Boucle sur le même état. (Problème lié à la chaise (e.g. chaise cassée, inaccessible...)).

Figure 29 : Exemple de caractérisation de la matrice fonctionnelle et identification des zones de risques potentielles.

La tâche « s'asseoir au bureau » est composée de 3 états. Chaque cellule illustre une transition depuis l'état en colonne vers l'état en ligne. La caractérisation de la matrice dépend du modèle SSS préalablement construit. Les transitions normales et attendues sont en vert, les transitions anormales et inattendues sont en orange, les transitions interdites ou fonctionnellement impossibles sont en rouge. La flèche « ↓ » indique le sens de la transition. Ici, la transitions $E_3 \rightarrow E_1$ est rouge du fait du lien de dépendance fonctionnelle existant entre $E_1 \rightarrow E_3$, rendant impossible la trajectoire inverse.

Sur la base des travaux d'Ashby, qui stipulent que la stabilité n'est pas toujours associée à la performance, la diagonale est caractérisée en orange.

b) Phase méthodologique 2 : Analyse des données

vi. Remplissage de la matrice d'analyse

Un second type de matrice, dite matrice d'analyse, permet de quantifier les comportements des opérateurs lors de l'analyse des données réelles et de comptabiliser les transitions observées. Une fois remplie, la matrice représente la trajectoire des opérateurs au sein de DSM. Notons que le premier type de matrice, dite matrice calque, est ensuite utilisée pour mettre en relief les comportements risqués observés lors de l'analyse. Chaque cellule de la matrice d'analyse est caractérisée par un chiffre représentant la somme des transitions observées pour chacune des transitions. Sur la base de ces fréquences observées, la probabilité de passage d'un état initial (i.e. un état colonne) à un état final (i.e. un état ligne) est calculée. Pour chaque état colonne, le calcul de la probabilité de passage de l'état colonne à chacun des états ligne repose sur, la fréquence observée de chacune des transitions, divisée par, la somme des transitions observées pour l'état concerné.

Le remplissage de la matrice d'analyse nécessite une phase d'observation et de codage des comportements. Cette phase est possible via l'enregistrement des situations de travail puis l'analyse, a posteriori, des comportements des opérateurs.

Nous détaillerons ici la méthodologie de codage des comportements composée des 5 étapes suivantes : retranscription des vidéos, identification des variables, identification de l'état, identification de la contrainte, remplissage de la matrice d'analyse.

➤ Retranscription des vidéos

La première étape consiste à retranscrire les vidéos mettant en scène un ou plusieurs opérateurs devant contrôler une situation de travail précise. Chaque opérateur est, dans un premier temps, associé à un code permettant d'identifier clairement sa spécialité professionnelle et son genre. Dès lors que deux opérateurs partagent la même spécialité, une numérotation est ajoutée pour éviter toute confusion. Ainsi, TECH1_H ; ART3_F ; ING-Cal_F sont des exemples de dénominations pouvant illustrer respectivement un technicien de maintenance, un artisan ou encore une ingénieure calcul.

Selon les objectifs de l'analyse, plusieurs types de comportements peuvent être observés : ce que disent les opérateurs et/ou ce que font les opérateurs. Tandis que le premier codage retranscrit mot pour mot le discours des opérateurs, le second met en évidence leurs comportements moteurs (e.g. manipulation d'objet, déplacements, actions sur un dispositif...). L'étape de retranscription des vidéos se réalise individuellement, un opérateur à la fois. Dès lors que l'opérateur en question dit quelque chose, la phrase est codée, depuis la majuscule jusqu'à la ponctuation indiquant la fin de la phrase. À chaque nouvelle phrase correspond une nouvelle ligne de code. Dès lors que l'opérateur réalise une action motrice, cette dernière est codée depuis le début de l'action jusqu'à son interruption ou la fin de sa réalisation. À chaque fois, le temps associé au comportement est relevé dans la vidéo.

Ainsi, une ligne de code se compose des éléments suivants : « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ». Une fois retranscrit, les discours et les actions motrices de chaque opérateur sont regroupés dans un seul et même tableau dont les lignes sont classées en fonction du temps.

➤ Identification des variables

Comme évoqué précédemment, la première étape de modélisation consiste à caractériser chaque état par une liste de variables essentielles à l'atteinte de l'état. Sur la base de cette liste, cette seconde phase de codage consiste à attribuer une variable à chaque comportement précédemment retranscrit. L'objectif étant d'identifier à quelle variable de cette liste se réfère le comportement observé. La ligne de code est alors dotée d'un élément supplémentaire (i.e. la variable) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ». Si un comportement ne relève d'aucune variable, ce dernier est grisé et n'est pas codé.

➤ Identification de l'état

Une fois la variable identifiée, cette dernière est rattachée à l'état auquel elle appartient. Initialement, chaque état est caractérisé par une liste de variable. Ici le processus est inverse, à partir des variables il est possible d'identifier dans quel état l'opérateur se situe compte tenu de son discours et de ses actions motrices. Le codage est à nouveau doté d'un élément supplémentaire (i.e. l'état) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ; État ».

➤ Identification de la contrainte

Dans la même logique, une fois l'état identifié, ce dernier est rattaché à une contrainte. Le codage est à nouveau doté d'un élément supplémentaire (i.e. la contrainte) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ; État ; Contrainte ». Ainsi, depuis la retranscription des vidéos et en passant par différentes étapes de codage qui permettent d'identifier, pour chaque comportement, une variable, un état, puis une contrainte, nous sommes capables de mettre en évidence comment les opérateurs répartissent leurs actions de contrôle au regard des états et des contraintes constituant notre modèle. Chaque comportement étant perçu comme une transition dans un espace d'état.

➤ Remplissage de la matrice

Une fois toute la vidéo retranscrite et codée, les transitions entre états sont comptabilisées et stockées dans la matrice d'analyse. Chaque cellule de la matrice étant marquée par un chiffre indiquant la somme des transitions observées pour la transition concernée. Ces « scores » sont ensuite exprimés en termes de probabilité de passage d'un état à un autre. Notons que les matrices peuvent être développées à l'échelle d'une équipe tout opérateur confondu, de façon individuelle pour chaque opérateur ou pour des groupes d'individus ayant des caractéristiques communes.

vii. Analyse et interprétation des données

Une fois la matrice d'analyse remplie, les données obtenues permettent de modéliser les comportements observés comme une succession de transitions dans un espace d'état. Les transitions les plus probables sont identifiées et permettent de mettre en lumière les « chemins » privilégiés par les opérateurs. La matrice calque permet ensuite de faire ressortir les transitions risquées, situées dans les zones inattendues ou interdites préalablement définies, qui nécessitent une analyse qualitative plus approfondie.

Les objectifs étant de (i) mettre en évidence la variabilité du système, (ii) identifier les trajectoires les plus probables, (iii) mener une analyse qualitative approfondie permettant l'identification des besoins en termes de conception.