



HAL
open science

Conception d'un jumeau numérique anthropocentré autoapprenant de système sociotechnique pour une organisation augmentée : Application à la maintenance des moteurs d'hélicoptères

Quentin Lorente

► To cite this version:

Quentin Lorente. Conception d'un jumeau numérique anthropocentré autoapprenant de système sociotechnique pour une organisation augmentée : Application à la maintenance des moteurs d'hélicoptères. Physique [physics]. Université de Bordeaux, 2025. Français. NNT : 2025BORD0365 . tel-05548044

HAL Id: tel-05548044

<https://theses.hal.science/tel-05548044v1>

Submitted on 11 Mar 2026

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.



HAL Authorization

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

PRÉPARÉE À L'ESTIA

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR (ED 209)
SPÉCIALITÉ : AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE, SIGNAL ET IMAGE, INGENIERIE COGNITIVE

Par Quentin LORENTE

**Conception d'un jumeau numérique anthropocentré autoapprenant
de système sociotechnique pour une organisation augmentée -
Application à la maintenance des moteurs d'hélicoptères**

Sous la direction de : Christophe MERLO
Co-directeur : Guy André BOY

Soutenue le 5 décembre 2025

Membres du jury :

M. Christophe MERLO	Professeur, Université de Bordeaux (Bidart)	Directeur de thèse
Mme Marija JANKOVIC	Professeure des universités, CentraleSupélec (Gif-sur-Yvette)	Rapporteuse
M. Bertrand ROSE	Professeur des universités, Université de Strasbourg	Rapporteur
Mme Anne-Marie BARTHE-DELANOË	Maître assistante, IMT Mines Albi	Examinatrice
M. Benoît LE BLANC	Professeur des universités, Bordeaux INP	Président du jury
M. Guy André BOY	Professeur des universités, ESTIA (Bidart)	Co-Directeur

Membres invités :

M. François THERMY	Ingénieur, Safran Helicopter Engines (Tarnos)	Encadrant industriel
M. Éric VILLENEUVE	Enseignant-Chercheur, ESTIA (Bidart)	Encadrant académique

Résumés en français et en anglais

Conception d'un jumeau numérique anthropocentré autoapprenant de système sociotechnique pour une organisation augmentée - Application à la maintenance des moteurs d'hélicoptères

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le champ de la maintenance aéronautique, un domaine caractérisé par une forte complexité technique et organisationnelle. Les décisions collectives y sont influencées à la fois par des données techniques issues des machines et par des dynamiques cognitives et sociales entre acteurs. Pour répondre à ces défis, un prototype de jumeau numérique anthropocentré et autoapprenant, appelé SOMA (Système Organique de Médiation Adaptative), a été conçu.

SOMA repose sur un modèle multi-agents inspiré des sciences cognitives, combinant les approches cognitiviste et connexionniste. Ce cadre permet d'orchestrer les interactions entre agents humains et machines dans un espace numérique structurant la prise de décision collaborative.

Deux contributions majeures accompagnent ce dispositif :

- L'introduction d'indicateurs stigmergiques, permettant de capitaliser sur les expériences passées et de renforcer la mémoire organisationnelle ;
- Le développement d'un outil d'évaluation de la cognition collective, la Collective Cognition Scale (CCS), inspirée des échelles d'utilisabilité.

Ces contributions ont été validées à travers une série d'expérimentations centrées utilisateurs. Les résultats démontrent une bonne utilisabilité du prototype (score SUS élevé), une influence mesurable des indicateurs stigmergiques sur les choix et les temps de décision, ainsi qu'une amélioration perçue de la cognition collective mesurée via la CCS.

Ces résultats ouvrent la voie à des recherches futures sur la généralisation des indicateurs stigmergiques, l'amélioration de l'outil CCS et l'exploration, par simulations, des conditions d'émergence d'une cognition collective robuste au sein d'organisations complexes. Cette dernière est rendue possible par les comportements humains révélés par les expériences, qui sont implémentables dans des systèmes multi-agents.

Ces travaux esquissent un horizon prospectif : celui d'une organisation augmentée, capable d'apprendre de manière continue, et où l'interconnexion des agents humains et machines pourrait progressivement favoriser l'émergence d'une forme de conscience organisationnelle.

Mots clés : jumeau numérique ; cognition collective ; stigmergie ; sciences cognitives ; systèmes multi-agents ; maintenance aéronautique ; apprentissage organisationnel ; conscience organisationnelle

Design of a self-learning, human-centered digital twin for sociotechnical systems: Towards augmented organizations – Application to helicopter engine maintenance

Abstract

This thesis addresses the field of aeronautical maintenance, a domain characterized by high technical and organizational complexity. Collective decisions in this context are shaped not only by technical data from machines but also by the cognitive and social dynamics among actors. To address these challenges, a prototype of a self-learning, human-centered digital twin, called SOMA (Organic System for Adaptive Mediation), was designed.

SOMA is based on a multi-agent model inspired by cognitive sciences, combining cognitivist and connectionist approaches. This framework enables the orchestration of interactions between human and machine agents within a digital space that structures collaborative decision-making.

Two major contributions support this system:

- The introduction of stigmergic indicators, which capitalize on past experiences and strengthen organizational memory.
- The development of a collective cognition evaluation tool, the Collective Cognition Scale (CCS), inspired by usability scales.

These contributions were validated through a series of user-centered experiments. The results demonstrate high usability of the prototype (with strong SUS scores), a measurable influence of stigmergic indicators on choices and decision times, and a perceived improvement in collective cognition as assessed through the CCS.

These findings open avenues for future research on the generalization of stigmergic indicators, the refinement of the CCS tool, and the exploration—through simulations—of the conditions required for the emergence of robust collective cognition within complex organizations. This exploration is made possible by the human behaviors revealed through experiments, which can be implemented in multi-agent systems.

Ultimately, this work outlines a prospective horizon: that of an augmented organization, capable of continuous learning, where the interconnection of human and machine agents may progressively foster the emergence of a form of organizational consciousness.

Keywords: digital twin ; collective cognition ; stigmergy ; cognitive science ; multi-agent systems ; aeronautical maintenance ; organizational learning ; organizational consciousness

C'est ce que je fais qui m'apprend ce que je cherche.

Pierre Soulages

Table des matières

Résumés en français et en anglais	i
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction générale	11
Chapitre 1 Cadre général des travaux et problématique	13
1.1 Contexte des travaux : la maintenance	14
1.2 Périmètre de travail : le département service et support	15
1.3 Problématique de recherche	16
1.4 Méthodologie de recherche	17
1.5 Synthèse du chapitre 1 et plan de lecture	18
Chapitre 2 De l'organisation à la prise de décision collective	20
2.1 Étude des organisations	20
2.1.1 Introduction	20
2.1.2 Organisation apprenante	23
2.1.3 Structure de l'organisation	24
2.2 Sciences cognitives	25
2.2.1 L'approche cognitiviste	26
2.2.2 L'approche connexionniste	27
2.2.3 Hybridation des approches	28
2.3 Synthèse : le choix des SMA	28
2.4 Étude de la prise de décision collective	29
2.4.1 Définitions	29
2.4.2 La conscience de situation	30
2.4.3 Le collectif lors de la prise de décision	32
2.4.4 Caractéristiques de la cognition collective	35
2.5 Synthèse : vers un système multi-agents pour l'aide à la décision collective	44
Chapitre 3 Proposition d'un cadre de modélisation pour la prise de décision collective	45
3.1 Les SMA comme support des organisations apprenantes	45
3.1.1 Les SMA : définitions	45
3.1.2 L'organisation : un système de systèmes	46
3.1.3 L'apprentissage	49
3.1.4 Le processus décisionnel de maintenance	52
3.1.5 Synthèse	57
3.2 Construction d'un modèle de système multi-agents	57
3.2.1 Approche pour la modélisation	57
3.2.2 Le modèle d'agent	60
3.2.3 Le modèle d'agence	63
3.2.4 Le modèle de prise de décision	66

3.3	Applicabilité des modèles proposés	68
3.3.1	Jumeau numérique et SMA	68
3.4	Application du cadre de modélisation	73
3.4.1	Description et analyse initiale de l'organisation étudiée	74
3.4.2	Modélisation de l'organisation étudiée	78
3.4.3	Améliorations envisagées	87
3.5	Synthèse	93
Chapitre 4 Proposition d'un environnement pour la prise de décision		94
4.1	Conception de l'environnement numérique	95
4.1.1	Démarche adoptée	95
4.1.2	Modèles implémentés	95
4.2	Implémentation du prototype	104
4.2.1	Démarche adoptée	104
4.2.2	Développement réalisé	108
4.3	Outils d'évaluation	113
4.3.1	Données personnelles	114
4.3.2	Utilisabilité	114
4.3.3	Cognition collective	115
4.3.4	Stigmergie	119
4.4	Synthèse	121
Chapitre 5 Application : tests et validation		122
5.1	Méthodologie pour l'expérimentation	122
5.2	Cadre des expérimentations	123
5.2.1	Évaluation de l'interface du système d'aide à la décision	123
5.2.2	Évaluation de l'effet d'un indicateur stigmergique	125
5.2.3	Évaluation de l'amélioration de la cognition collective	126
5.3	Mise en œuvre des expérimentations	126
5.3.1	Objectifs poursuivis	127
5.3.2	Protocole mis en place	128
5.4	Analyse des résultats	144
5.4.1	Variables étudiées	144
5.4.2	Utilisateurs étudiés	148
5.4.3	Utilisabilité du système	148
5.4.4	Impact direct des indicateurs stigmergiques	149
5.4.5	Analyse du temps de choix	157
5.4.6	Impact temporel des indicateurs stigmergiques	163
5.4.7	Cognition collective	165
5.5	Synthèse et discussion	168
Conclusion		171
Limites et perspectives		172
Références / Bibliographie		174
Annexes		190
Annexe A : Les sciences cognitives derrière la modélisation		190

Annexe B : Le formulaire de consentement	202
Annexe C : Caractéristiques du sujet (1^{er} questionnaire)	204
Annexe D : Échelle de cognition collective (1^{er} et 3^{ième} questionnaires)	205
Annexe E : Utilisabilité (2^{ième} questionnaire)	206
<i>Bibliographie de l'auteur</i>	207

Liste des tableaux

TABLEAU 3.1 : CROISEMENT DES ETAPES DECISIONNELLES GENERIQUES DE MAINTENANCE ET DES ETAPES DECISIONNELLES DE ENDSLEY.	53
TABLEAU 3.2 : CROISEMENT DES ETAPES DECISIONNELLES DE MAINTENANCE ET DES NIVEAUX DE RASMUSSEN...	54
TABLEAU 3.3 : EXEMPLE : CROISEMENT DES ETAPES DECISIONNELLES DE MAINTENANCE ET DE L'ORGANISATION COMPOSEE DES TROIS AGENTS.....	55
TABLEAU 3.4 : CROISEMENT DES NIVEAUX DE CONDUITE (RASMUSSEN, 1983) ET DES ETAPES DE PROCESSUS DECISIONNEL DE (ENDSLEY, 1995).	55
TABLEAU 3.5 : CROISEMENT DE L'ORGANISATION PRECEDENTE ET DES ETAPES DE PROCESSUS DECISIONNEL DE (ENDSLEY, 1995)	55
TABLEAU 3.6 : CROISEMENT DU SYSTEME MULTI-AGENTS, DES NIVEAUX DE CONDUITE DE (RASMUSSEN, 1983), DES ETAPES DE PROCESSUS DECISIONNEL DE (ENDSLEY, 1995) ET DE L'ORGANISATION PRECEDENTE	56
TABLEAU 4.1 : TYPES DE DONNEES DES ECHANGES QUI COMPOSENT LES PHASES DE LA PRISE DE DECISION COLLABORATIVE.	103
TABLEAU 4.2 : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES OUTILS D'EVALUATION DE SYSTEME.....	115
TABLEAU 4.3 : ORIGINES D'INSPIRATIONS ISSUES DE TESTS INDIVIDUELS EXISTANTS POUR LES ITEMS DU CCS. ...	118
TABLEAU 5.1 : RESULTATS FINAUX AU SUS DE CHAQUE UTILISATEUR.....	149
TABLEAU 5.2 : RESULTATS DE L'ANOVA DES VARIABLES INDEPENDANTES SUR LA VARIABLE POURCENTAGE	151
TABLEAU 5.3 : RESULTATS DE LA REGRESSION LINEAIRE POUR LA VARIABLE POURCENTAGE	154
TABLEAU 5.4 : RESULTATS DE L'ANOVA DES VARIABLES INDEPENDANTES SUR LA VARIABLE TEMPS	159
TABLEAU 5.5 : RESULTATS DE LA REGRESSION LINEAIRE POUR LE LOGARITHME DE LA VARIABLE TEMPS	162
TABLEAU 5.6 : NOTES FINALES AVANT (CCS1) ET APRES (CCS2) LES EXPERIENCES AU CCS POUR CHAQUE UTILISATEUR.....	165

Liste des figures

FIGURE 1.1 : MAINTENANCE 5.0, INSPIRE DE (CORTES-LEAL ET AL., 2022)	14
FIGURE 1.2 : REPRESENTATION CLASSIQUE DU PROCESSUS DU SERVICE ET SUPPORT CHEZ SHE	16
FIGURE 1.3 : SEQUENCES METHODOLOGIQUES DE RECHERCHE.....	18
FIGURE 2.1 : MODELE DE CONSCIENCE DE SITUATION DANS LA PRISE DE DECISION DYNAMIQUE ADAPTE DE (ENDSLEY, 1995)	31
FIGURE 2.2 : DECISION PARTAGEE, ADAPTE DE (ELWYN ET AL., 2012).....	32
FIGURE 2.3 : RELATION CURVILIGNE ENTRE FREQUENCE DE COMMUNICATION ET PERFORMANCE, ADAPTE DE (PATRASHKOVA-VOLZDOSKA ET AL., 2003).....	37
FIGURE 2.4 : METACOGNITION ET CONTROL COGNITIF SUPRA-PERSONNEL ADAPTE DE (SHEA ET AL., 2014)	38
FIGURE 2.5 : ORGANISATION EMERGENTE. ICI CHAQUE OISEAU PROFITE DU SILLAGE DE CELUI QUI LE DEVANCE POUR ECONOMISER DE L'ENERGIE EN SE POSITIONNANT DESSUS, COMME UN SURFEUR SUR UNE VAGUE, CE QUI CREE CETTE FORME DE « V » DE LOIN. IL SE RELAYERONT POUR REMPLACER LA PLACE DU PREMIER, PLUS FATIGANTE.....	40
FIGURE 2.6 : STIGMERGIE INDIQUANT AUX FOURMIS LE CHEMIN LE PLUS COURT ENTRE UNE SOURCE DE NOURRITURE ET LA FOURMILIERE	41
FIGURE 2.7 : APPRENTISSAGE STIGMERGIQUE ET DISTANCE D'INFLUENCE ADAPTE DE (XU ET AL., 2019)	43
FIGURE 3.1 : SCHEMATISATION DE LA GRILLE D'(ARDOINO, 1978) AVEC MISE EN REGARD POUR CHAQUE NIVEAU DE SON PENDANT EN MILIEU D'ENTREPRISE.	49
FIGURE 3.2 : COCREATION ENTRE LE SMA ET L'ORGANISATION	58
FIGURE 3.3 : SEUILS DE DECLENCHEMENT DE SOLlicitATIONS D'AGENTS TIERS POUR UNE COLLABORATION	58
FIGURE 3.4 : IMPACT DES DISCIPLINES DES SCIENCES COGNITIVES SUR LES CARACTERISTIQUES NECESSAIRES A LA MODELISATION.....	59
FIGURE 3.5 : UN AGENT ET SA COMMUNICATION AVEC L'ENVIRONNEMENT	61
FIGURE 3.6 : AGENTS AU CHAMP D'INTERACTIONS INCOMPLET.	63
FIGURE 3.7 : AGENCE DANS UN SYSTEME MULTI-AGENTS.....	64
FIGURE 3.8 : SYSTEME MULTI-AGENTS DECISIONNEL.....	66
FIGURE 3.9 : DECISION COLLABORATIVE INSPIREE DE LA PUBLICATION DE (ELWYN ET AL., 2012)	67
FIGURE 3.10 : NIVEAUX D'INTEGRATION DES DONNEES ADAPTE DE (KRITZINGER ET AL., 2018)	69
FIGURE 3.11 : ORGANISATION REPRESENTEE SOUS FORME DE SYSTEME MULTI-AGENTS ET SON JUMENT NUMERIQUE. DES COMMUNICATIONS MANQUANTES DANS LE JUMENT PHYSIQUE SONT ETABLIES DANS LE JUMENT NUMERIQUE	71
FIGURE 3.12 : INDICATEURS STIGMERGIQUES. EN VERT, IL S'AGIT D'UN RETOUR POSITIF D'UNE OCCURRENCE PASSEE ; EN GRIS, LE RESULTAT EST INCONNU ; EN ROUGE, LE RESULTAT EST NEGATIF.....	72
FIGURE 3.13 : EXEMPLES D'APPARENCE DE DOCUMENT EXPLOITE DANS L'ANALYSE D'ACTIVITE.	79
FIGURE 3.14 : DIAGRAMME BPMN D'UN PROCESSUS DE MAINTENANCE ET DE DECISION COLLABORATIVE.	81
FIGURE 3.15 : SERVICE BLUEPRINT DU PROCESSUS COLLABORATIF DU POINT DE VUE DU FR.....	82
FIGURE 3.16 : SERVICE BLUEPRINT DU PROCESSUS COLLABORATIF DU POINT DE VUE DU SE.	83
FIGURE 3.17 : SERVICE BLUEPRINT DU PROCESSUS COLLABORATIF DU POINT DE VUE DU HM.	84
FIGURE 3.18 : RAREFACTION DE L'INFORMATION, EN PARTICULIER DES RECOMPENSES, AVEC LA DISTANCE DANS LE RESEAU MULTI-AGENTS.	85
FIGURE 3.19 : BOUCLE SIMPLE DE MAINTENANCE ADAPTE DE (CORTES-LEAL ET AL., 2022).RAPPORTEE A LA RESOLUTION DE PROBLEME D'UN AGENT ADAPTEE DES ETAPES DECISIONNELLES DE LA SECTION 3.2.4.....	85
FIGURE 3.20 : : BOUCLE COMPLEXE DE MAINTENANCE EN RESEAU RAPPORTEE A LA RESOLUTION DE PROBLEME COLLABORATIVE MULTI-AGENTS.	86
FIGURE 3.21 : LA SITUATION DU CONCEPT D'UTILISABILITE DANS CELUI D'ACCEPTABILITE, SELON (NIELSEN, 1993).	87
FIGURE 3.22 : DIAGRAMME UML DE LA COLLABORATION « AS IS » ENTRE HM, SE ET FR.....	88
FIGURE 3.23 : DIAGRAMME DE LA COLLABORATION "TO BE" ENTRE HM, SE, FR ET L'AGENT MEDIATEUR/ANALOGISTE.	89
FIGURE 3.24 : DIAGRAMME BPMN "AS IS" DE LA COLLABORATION AUGMENTEE.	90

FIGURE 3.25 : EXEMPLE D'ASPECT APPROXIMATIF D'INTERFACE COLLABORATIVE D'INTEGRATION DES AGENTS HUMAINS DANS L'ORGANISATION.	92
FIGURE 4.1 : MODELE GENERAL D'ECHANGES DANS LA PRISE DE DECISION COLLABORATIVE PERMETTANT UN APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT.	96
FIGURE 4.2 : REPARTITION MULTI-AGENTS DES ECHANGES « AS IS » DU SCENARIO 1.	97
FIGURE 4.3 : REPARTITION MULTI-AGENTS DES ECHANGES « TO BE » DU SCENARIO 1.	98
FIGURE 4.4 : SEPARATION DES ECHANGES DE CHAQUE AGENT AVEC LE PROTOTYPE.	99
FIGURE 4.5 : DECOMPOSITION DES ECHANGES PAR TYPES DE DONNEES.	100
FIGURE 4.6 : FLUX DE DONNEES EXHAUSTIFS DANS LES ECHANGES ENTRE UN UTILISATEUR GENERIQUE ET LE PROTOTYPE.	101
FIGURE 4.7 : MODELES COMPLEMENTAIRES SIMPLIFIES DE DELIBERATION DE (ELWYN ET AL., 2012) ET DE CONSCIENCE DE SITUATION DANS LA PRISE DE DECISION DYNAMIQUE DE (ENDSLEY, 1995)	105
FIGURE 4.8 : ONGLETS ET BOUCLES D'APPRENTISSAGE DECISIONNEL.	105
FIGURE 4.9 : REPRESENTATION SEQUENTIELLE DU PROCESSUS VISUEL.	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 4.10 : REPRESENTATION COMPLEXE DES RETROACTIONS DANS LE PROCESSUS VISUEL.	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 4.11 : DISPOSITION DES INTERFACES D'EXPERIENCES PAR ONGLETS.	108
FIGURE 4.12 : ONGLET DE DEFINITION D'UNE REQUETE ET DE L'AGENCE PARTICIPANTE.	110
FIGURE 4.13 : ONGLET DE DELIBERATION SUR LES OPTIONS ET DE REPONSE A UNE REQUETE.	111
FIGURE 4.14 : ONGLET D'EVALUATION DES ELEMENTS DE LA REQUETE ET DE SON TRAITEMENT.	112
FIGURE 4.15 : ONGLET DES RESULTATS DES EVALUATIONS ET DU RETOUR DES CONSEQUENCES DE LA DECISION POUR CETTE REQUETE.	113
FIGURE 5.1 : EXPERTS EN COURS DE PARTICIPATION AUX SESSIONS EXPERIMENTALES.	122
FIGURE 5.2 : EXEMPLE 1 DE L'ASPECT GENERAL DES INTERFACES DU SYSTEME SOMA.	124
FIGURE 5.3 : EXEMPLE 2 DE L'ASPECT GENERAL DES INTERFACES DU SYSTEME SOMA.	124
FIGURE 5.4 : INDICATEURS STIGMERGIQUES RESULTANTS DES EXPERIENCES PASSES.	125
FIGURE 5.5 : CHOIX ENTRE DES OPTIONS VOLONTAIREMENT EQUIVALENTES EN COUT ET PROBABILITE HORS INDICATEURS STIGMERGIQUES.	126
FIGURE 5.6 : ENVIRONNEMENT EXPERIMENTAL.	129
FIGURE 5.7 : INTERFACE DE CONNEXION.	131
FIGURE 5.8 : ACCES A L'ONGLET DES REQUETES DEPUIS LE TABLEAU DE BORD.	132
FIGURE 5.9 : BOUTON DE CREATION D'UNE NOUVELLE REQUETE DANS L'ONGLET DES REQUETES.	132
FIGURE 5.10 : CHAMPS DE DEFINITION D'UNE NOUVELLE REQUETE.	133
FIGURE 5.11 : APPROBATION DE LA SUGGESTION D'UN TIERS.	134
FIGURE 5.12 : VALIDATION DE LA CREATION D'UNE NOUVELLE REQUETE.	134
FIGURE 5.13 : CHAMPS DE DEFINITION D'UNE NOUVELLE PROPOSITION D'OPTION.	135
FIGURE 5.14 : ACCES AUX NOTIFICATIONS.	136
FIGURE 5.15 : ONGLET DES NOTIFICATIONS.	136
FIGURE 5.16 : CHOIX DES OPTIONS COMPORTANT DES INDICATEURS STIGMERGIQUES (RETEX) ET VALIDATION.	137
FIGURE 5.17 : ONGLET D'EVALUATIONS DES ECHANGES ET DE LA SOLUTION.	138
FIGURE 5.18 : ONGLET DES RESULTATS DES EVALUATIONS DES PARTICIPATIONS ET DE LA SOLUTION.	139
FIGURE 5.19 : INDICATEURS STIGMERGIQUES.	140
FIGURE 5.20 : EXEMPLE DE DILEMME AVEC DES BOUTONS DE CHOIX.	141
FIGURE 5.21 : EXEMPLE DE DILEMME TEMOIN.	142
FIGURE 5.22 : CORRELATION ENTRE LES INDICATEURS DU SIXIEME UTILISATEUR ET DU SEPTIEME UTILISATEUR SUR LE PREMIER DILEMME (FAUX POSITIF) DE LA PREMIERE PAIRE (PERSISTANCE FAIBLE) D'INDICATEURS CORRELES.	143
FIGURE 5.23 : CORRELATION ENTRE LES INDICATEURS DU SIXIEME UTILISATEUR ET DU SEPTIEME UTILISATEUR SUR LE PREMIER DILEMME (FAUX POSITIF INITIAL) DE LA DEUXIEME PAIRE (PERSISTANCE DE TROIS PAS ITERATIFS) D'INDICATEURS CORRELES.	143
FIGURE 5.24 : CORRELATION ENTRE LES INDICATEURS DU SIXIEME UTILISATEUR ET DU SEPTIEME UTILISATEUR SUR LE PREMIER DILEMME (FAUX POSITIF INITIAL) DE LA TROISIEME PAIRE (PERSISTANCE PERPETUELLE) D'INDICATEURS CORRELES.	144

FIGURE 5.25 : DIAGRAMMES EN SECTEURS PRESENTANT LA REPARTITION FEMMES/HOMMES ET LA REPARTITION PAR SERVICE	148
FIGURE 5.26 : HISTOGRAMME DES AGES REPARTIS SELON DES CLASSES D'INTERVALLES EGAUX	148
FIGURE 5.27 : SIGNIFICATION DU SCORE AU SUS (ADAPTEE DE BANGOR, KORTUM ET MILLER, 2009)	149
FIGURE 5.28 : BOITE A MOUSTACHE DES RESULTATS FINAUX AU SUS.....	149
FIGURE 5.29 : MOYENNES DE LA VARIABLE POURCENTAGE POUR CHAQUE FACTEUR	150
FIGURE 5.30 : DIAGRAMME DES INTERACTIONS ENTRE PROP.K ET COULEUR.K.POSITIF DANS LEUR EFFET SUR POURCENTAGE	152
FIGURE 5.31 : HISTOGRAMME DES RESIDUS DE L'ANOVA ET DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE	153
FIGURE 5.32 : GRAPHIQUE D'HOMOSCEDASTICITE DES RESIDUS.....	154
FIGURE 5.33 : HISTOGRAMME DES RESIDUS DE L'ANOVA ET DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE	156
FIGURE 5.34 : GRAPHIQUE D'HOMOSCEDASTICITE DES RESIDUS.....	156
FIGURE 5.35 : MOYENNES DE LA VARIABLE TEMPS POUR CHAQUE FACTEUR	157
FIGURE 5.36 : GRAPHIQUE CONDITIONNEL A FACETTES DES INTERACTIONS DES FACTEURS SUR TEMPS	160
FIGURE 5.37 : HISTOGRAMME DES RESIDUS DE L'ANOVA ET DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE	160
FIGURE 5.38 : GRAPHIQUE D'HOMOSCEDASTICITE DES RESIDUS.....	161
FIGURE 5.39 : DIAGRAMME DES ERREURS CUMULEES DE L'EXPERIENCE DES INDICATEURS STIGMERGIQUES CORRELES ENTRE LES UTILISATEURS	164
FIGURE 5.40 : MOYENNES DES ERREURS CUMULEES EN FONCTION DE LA PERSISTANCE DES INDICATEURS STIGMERGIQUES.....	164
FIGURE 5.41 : HISTOGRAMMES DE REPARTITION DES RESULTATS FINAUX AUX CCS	166
FIGURE 5.42 : BOITES A MOUSTACHES DE REPARTITION DES RESULTATS FINAUX AUX CCS	166
FIGURE 5.43 : GRAPHIQUE EN BARRES DES NOTES FINALES AUX CCS POUR CHAQUE UTILISATEUR.....	167
FIGURE A.1 : COCREATION ENTRE LE SMA ET L'ORGANISATION	191
FIGURE A.2 : SEUILS DE DECLENCHEMENT DE SOLLICITATIONS D'AGENTS TIERS POUR UNE COLLABORATION	194
FIGURE A.3 : IMPACT DES DISCIPLINES DES SCIENCES COGNITIVES SUR LES CARACTERISTIQUES NECESSAIRES A LA MODELISATION.....	201

Introduction générale

Les organisations modernes, en particulier celles évoluant dans des domaines hautement techniques comme la maintenance de moteurs d'hélicoptères, sont confrontées à une complexité croissante (Maynard, 2015). Cette complexité découle non seulement de la technicité des opérations, mais aussi de la dimension humaine et sociale qui sous-tend chaque prise de décision. Ces systèmes sociotechniques, dans lesquels humains et machines interagissent, exigent une coordination fine et une capacité à s'adapter aux défis émergents. Concrètement dans le cadre du service de support des moteurs d'hélicoptères, une collecte de données issues des machines permet de détecter par exemple des anomalies de performances (comme des écarts de vitesses, de températures, de vibrations). Ces anomalies sont des symptômes associés à des problèmes possibles à régler (comme une pièce abîmée) pour éviter des conséquences à venir (comme une indisponibilité non planifiée de la machine, une mise en danger). Face à ces problèmes soupçonnés, une décision de réponse peut être prise, basée sur les connaissances théoriques, qui donne lieu à une mise en œuvre pratique basée sur le savoir-faire opérationnel (comme une inspection, un changement de pièce ou de moteur).

De la détection à l'intervention, un processus décisionnel de maintenance représente une longue chaîne de mises en œuvre de connaissances. Chaque maillon de cette chaîne est complexe et évolutif (Patriarca et al., 2018). Ainsi, les experts leur appartenant peuvent rencontrer des difficultés pour identifier leurs pairs, communiquer avec eux afin de combiner les connaissances pour répondre au mieux à la situation, et, au fil du temps, intégrer l'expérience acquise de ces décisions collaboratives.

Face à cette complexité, il devient nécessaire de s'appuyer sur des représentations numériques capables de condenser et structurer l'information issue des multiples interactions entre acteurs et machines. Ces espaces numériques offrent un support pour explorer différents scénarios, réduire la complexité perçue et mieux gérer les paramètres d'interconnexion entre les agents impliqués dans la décision (Camara Dit Pinto et al., 2024). Dans ce prolongement, les jumeaux numériques apparaissent comme des outils puissants pour modéliser, surveiller et optimiser les processus organisationnels. Cependant, la majorité de ces systèmes se concentrent sur des aspects purement techniques, négligeant souvent les dynamiques cognitives et sociales qui influencent les performances collectives (Adel, 2022). Cette thèse s'inscrit dans cette problématique en proposant le développement de SOMA (Système Organique de Médiation Adaptative), un jumeau numérique anthropocentré et autoapprenant conçu pour améliorer la cognition collective au sein d'organisations complexes.

SOMA repose sur une approche multi-agents inspirée des sciences cognitives, où humains et machines interagissent dans un environnement numérique structuré pour soutenir la prise de décision collective. L'originalité de ce système tient à l'intégration d'indicateurs stigmergiques, permettant de capitaliser sur les traces laissées par les expériences passées afin d'améliorer la mémoire organisationnelle et l'efficacité des interactions. Une série d'expérimentations a été conduite pour évaluer l'utilisabilité du système et mesurer son

impact sur la cognition collective. Les résultats obtenus ont confirmé la pertinence de l'approche et ouvert des perspectives pour la simulation et l'optimisation des dynamiques collectives au sein d'organisations complexes.

La question de recherche étudiée peut donc être formulée ainsi :

- Comment faciliter la prise de décision collective au sein d'une organisation impliquée dans des processus collaboratifs non prédéfinis, notamment dans le cadre de la maintenance ?

Cette problématique sera déclinée en sous-questions spécifiques présentées dans le premier chapitre du manuscrit, portant sur la modélisation des organisations complexes, la formalisation de la décision collective et l'outillage numérique adapté à ce contexte.

Les travaux ont ainsi abouti aux contributions suivantes :

- La conception d'un espace numérique cadrant les processus décisionnels collaboratifs au sein d'organisations complexes.
- L'introduction d'indicateurs stigmergiques favorisant l'apprentissage organisationnel à partir des traces d'expériences passées.
- Le développement d'un outil d'évaluation de la cognition collective, la Collective Cognition Scale (CCS).
- L'exploitation de la métaphore du cerveau comme fil conducteur conceptuel, mobilisée comme outil intellectuel pour éclairer la modélisation et le développement de SOMA.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche), et financée par l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et l'entreprise Safran Helicopter Engines. Elle s'inscrit dans la chaire FlexTech, qui réunit CentraleSupélec et l'ESTIA, et s'est déroulée au sein du laboratoire ESTIA-Recherche (Bidart) et de l'entreprise Safran Helicopter Engines (Tarnos), qui a fourni le terrain d'étude et participé activement au projet.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres principaux.

- La première partie introduit le cadre général des travaux et la problématique, en précisant le contexte de la maintenance, le périmètre étudié et la méthodologie de recherche adoptée.
- La deuxième partie propose un ancrage théorique en étudiant l'organisation et la prise de décision collective, en mobilisant les apports des sciences cognitives, et en justifiant le choix des systèmes multi-agents comme modèle.
- La troisième partie présente le cadre de modélisation pour la prise de décision collective, articulé autour des SMA et du concept de jumeau numérique.
- La quatrième partie décrit l'environnement numérique conçu et les outils d'évaluation associés, puis détaille le prototype développé.
- Enfin, la cinquième partie expose les expérimentations réalisées, l'analyse des résultats et les perspectives de recherche.

Un plan de lecture détaillé est proposé à la fin du chapitre 1.

Chapitre 1 Cadre général des travaux et problématique

Le contexte actuel de quatrième révolution industrielle (Maynard, 2015) se base sur le développement de technologies comme la robotique, le traitement de données, l'intelligence artificielle, la fabrication additive ou l'internet des objets (Ustundag & Cevikcan, 2018). La transformation digitale des systèmes de production soulève des problématiques d'interopérabilité entre les machines mais également de communication et de collaboration entre une multitude de parties prenantes de différentes disciplines. Cette compréhension multilatérale peut être favorisée par la promotion d'une empathie permettant une appréciation partagée des défis et donc la mise en œuvre de solutions reflétant et respectant les différentes perspectives (Maynard, 2015). Cette quatrième révolution industrielle est donc tout aussi prometteuse que source de complexité. La cinquième révolution industrielle est déjà évoquée et anticipée même si ses implications ne sont pas encore maîtrisées ni ne font l'objet d'un consensus (Adel, 2022; Ciucu-Durnoi et al., 2024; Crnobrnja et al., 2023). Elle semble se concentrer notamment sur une montée en niveau de la personnalisation de services et produits fournis aux clients ainsi qu'un recentrage de l'industrie sur l'humain (Alves et al., 2023). En effet, l'industrie 5.0, grâce à une meilleure revalorisation industrielle, permet une prévention de gaspillages qu'ils soient physiques (déchets de ligne de production), urbains (espaces inutilisés), processus (surproduction, circulation de véhicules vides) ou sociaux (sous-utilisation de compétences, chômage technologique) (Rada, 2018). Elle permet également selon le Comité Économique et Social Européen (EESC) de prévenir le gaspillage de la capacité humaine de résolution de problème, de compréhension profonde du client ainsi que de sa créativité en les combinant avec la rapidité, la productivité et la cohérence des robots (EESC, 2018).

C'est dans ce contexte qu'évolue l'entreprise Safran Helicopter Engines (SHE). Cette dernière constitue le terrain d'étude dans le cadre de cette thèse CIFRE, financée par SHE et l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). Elle émane de la chaire FlexTech copilotée par ESTIA-Recherche et CentraleSupélec, qui vise à répondre aux défis d'innovation par le développement de technologies flexibles et intelligentes en combinant recherche fondamentale et applications pratiques. SHE est une entreprise française spécialisée dans la conception, la production et la maintenance de moteurs d'hélicoptères qui possède des filiales dans différents pays du monde. L'histoire de SHE remonte aux années 1930, lorsque l'entreprise a été fondée sous le nom de Turbomeca. Au fil du temps, elle s'est développée pour devenir l'un des principaux acteurs du marché des moteurs d'hélicoptères, avec une gamme diversifiée de produits destinés à différents segments de l'industrie. Le site de Tarnos (40), faisant l'objet de cette étude, est plus précisément spécialisé dans la maintenance des moteurs d'hélicoptères.

1.1 Contexte des travaux : la maintenance

La maintenance des moteurs d'hélicoptères recouvre les domaines classiques de toute activité de Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) tels que le remplacement des pièces, voire des moteurs défectueux, la gestion des stocks, le diagnostic des pannes, la documentation, et la formation des clients.

Dans sa gamme de services, SHE propose un contrat 'support-by-the-hour' (SBH), c'est-à-dire un forfait à l'heure de vol présentant un coût fixe pour le client, et a pour stratégie d'étendre cette modalité au plus grand nombre de ses clients possible. Il est donc dans son intérêt de réduire les coûts de maintenance en la rendant plus prédictive et précise afin d'améliorer l'attractivité et la performance de ce service tout en restant compétitif. En effet, la résolution d'un problème technique par le remplacement d'une pièce particulière au lieu du remplacement d'un moteur entier par exemple, peut permettre d'assurer le même niveau de sécurité de manière moins onéreuse. De même diagnostiquer la survenance d'une panne avant qu'elle n'empêche le client d'utiliser l'hélicoptère permet de réaliser la réparation sans gêner l'exploitation de l'hélicoptère. Ainsi, pour mener à bien les multiples activités qui entourent la maintenance, SHE accorde une grande importance à l'innovation via la Recherche et Technologie (R&T). Cette innovation constante en fait une organisation aux experts toujours plus nombreux et aux outils techniques toujours plus variés et spécialisés. Cette organisation, que l'on peut donc appeler un système sociotechnique (Trist & Bamforth, 1951), a atteint un niveau de complexité tel que la gestion des enjeux liés au contexte précédemment présenté de l'industrie 5.0 lui est cruciale. À ce propos, la maintenance 5.0 est un concept récemment évoqué dans la littérature, notamment pour mentionner le fait que la présence d'un humain dans la boucle, comme représenté sur la Figure 1.1, améliore la résilience de ce système de maintenance (Cortés-Leal et al., 2022). Autrement dit, cela améliore la capacité du système à gérer des événements imprévus de manière plus efficace.

Cette disposition se retrouve dans le cadre de travail portant sur la maintenance des moteurs d'hélicoptères. Au moins un humain doit rester présent dans la boucle des décisions de maintenance, d'autant que, sans son contrôle, la surdétection de problèmes — biais connu des systèmes de 'health monitoring' autonomes — conduirait à formuler des recommandations de maintenance injustifiées et trop fréquentes. Ainsi en va-t-il de la confiance de l'utilisateur de l'hélicoptère chez le client, qui en serait altérée.

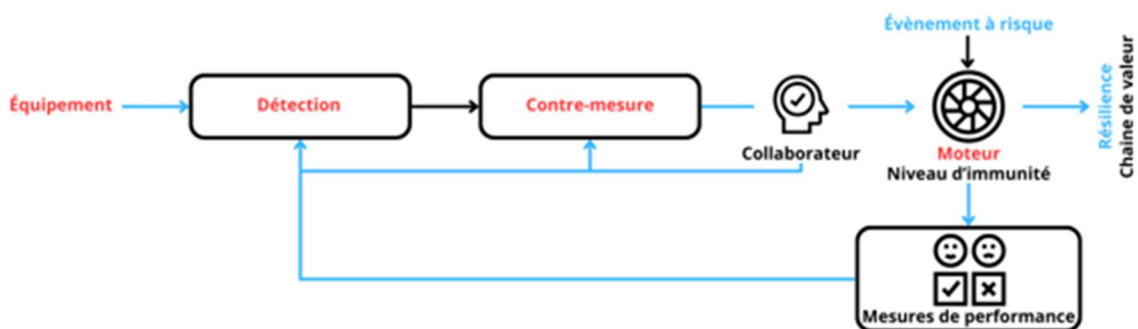


Figure 1.1 : Maintenance 5.0, inspiré de (Cortés-Leal et al., 2022)

1.2 Périmètre de travail : le département service et support

La maintenance des moteurs d'hélicoptères peut donner lieu à des actions physiques sur ces moteurs autant sur les hélicoptères directement, qu'en atelier (usine) après le démontage du moteur. Mais à cela précèdent des décisions prises sur la base d'évènements signalés par le client lui-même, ou par des observations permises via la collecte automatique de données de vol via les capteurs existant sur les machines, des données environnementales. Les données collectées sont traitées quotidiennement et alertent éventuellement la compétence experte en charge du client. Ces recherches se placent dans le périmètre du département « Service et Support » de SHE assurant ces sous-activités cognitives de maintenance que sont les liens avec les clients, ces observations, diagnostics et décisions.

D'une part, la diversité des clients, quant à leur culture, leur historique et leur contexte d'utilisation du produit donne lieu à une complexité concernant la relation unique établie par SHE avec chacun d'entre eux via des interlocuteurs de proximité. D'autre part, l'objet lui-même de la maintenance, le moteur d'hélicoptère, est un système d'une grande complexité, d'autant plus que plusieurs modèles sont présents dans le catalogue de SHE, et pour chaque modèle, plusieurs configurations co-existent, les produits ayant un cycle de vie assez long (40 ans). Il met en jeu de nombreuses expertises. Par exemple, dans le domaine du support, des experts connaissent des techniques de mesures d'usures de certaines pièces et d'autres experts connaissent les limites acceptables de ces usures. Ou encore, des experts étudient les tendances normales ou anormales dans les données collectées depuis les hélicoptères comme les vitesses et températures, et d'autres experts savent étudier plus minutieusement une sous-catégorie de ces données, comme les vibrations. Ces connaissances, compétences et savoir-faire sont distribués sur un nombre important de collaborateurs. Comme ordres de grandeur, ces dernières compétences citées représentent 150 personnes regroupées dans le département support technique du site de Tarnos. Ceci exclue les autres métiers liés comme le domaine commercial, logistique, technique et d'opérations. Les clients gérés sont au nombre de 2500 sur lesquels se répartissent 21500 moteurs.

Ces deux sources de complexité, sur le plan extérieur pour les relations clients, et sur le plan intérieur, pour les connaissances métiers, viennent se combiner et demandent une prise en charge largement pluridisciplinaire. La description précise des fonctions hétérogènes des collaborateurs et de leurs outils qui composent ces activités serait vaine car obsolète dans les années qui la suivraient. En effet elles évoluent au gré des possibilités apportées par les nouvelles technologies, entraînant l'apparition et l'intégration de nouvelles expertises et fonctions en permanence tandis que d'autres disparaissent. Toute tentative de figer une image précise des processus à un instant donné serait également vaine et contre-productive. Toutefois, cette réflexion porte sur les moindres détails des tâches, tandis que les processus peuvent être présentés dans leurs grandes lignes, lesquelles sont plus stables dans le temps.

La Figure 1.2 correspond à une représentation (non exhaustive) classique d'un processus d'échange lors de la détection d'un problème moteur dans le cas où ce problème est détecté par le client. Le client contacte (1) le Représentant Terrain ('Field Representative' ou FR) de SHE qui lui a été attribué. Celui-ci lui apporte les réponses nécessaires ou, si la requête sort du cadre de ses compétences, contacte (2) un Ingénieur Service ('Service Engineer' ou SE), typiquement pour des questions techniques pointues. Au besoin, le SE peut contacter à son

tour (3) de nombreux experts compétents dans des domaines particuliers directement, ou consulter des outils que ces experts ont mis à disposition.

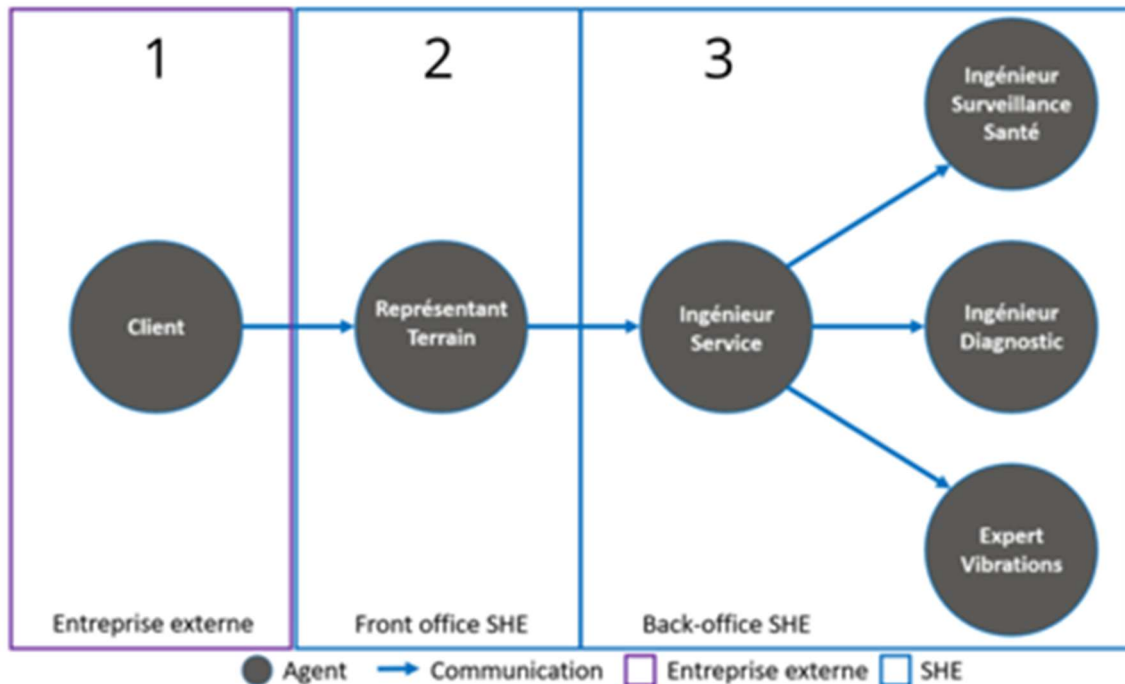


Figure 1.2 : Représentation classique du processus du service et support chez SHE

Cependant, il n'est pas toujours évident de savoir à qui s'adresser pour la résolution d'un problème et la prise d'une décision. Les différents collaborateurs ne se connaissent pas toujours. De plus, cette représentation linéaire s'avère à l'heure actuelle réductrice vis-à-vis de la réalité des évolutions de ces dernières années. Par exemple, l'Ingénieur de Surveillance de la Santé des moteurs ('Health Monitoring' ou HM) traite des données provenant directement de capteurs placés sur les machines des clients. Des alertes d'anomalies de tendances mesurées (températures, vitesses ...) peuvent donc être à l'initiative du HM lui-même ou du SE et les chaînes de communications prendre une voie plus complexe.

1.3 Problématique de recherche

Comme évoqué dans la section précédente, dans une industrie complexe, telle que la maintenance des moteurs d'hélicoptères, chaque acteur ne possède qu'une partie des informations, connaissances, compétences et savoir-faire nécessaires, ce qui induit pour chacun une vision partielle de la situation.

Pourtant, ces connaissances et cette conscience de la situation sont nécessaires pour mener au mieux l'activité. Une meilleure conscience de situation devrait conduire à une meilleure qualité des décisions (Endsley & Garland, 2000), ce qui est d'une importance stratégique (Salvado et al., 2022). Endsley a défini la conscience de la situation comme (1) la perception des éléments d'un environnement situé dans l'espace et dans le temps, (2) la compréhension de leur signification et (3) la projection de leur état dans le futur (Endsley, 1995).

Le processus de prise de décision est basé sur l'expertise, les techniques et les outils personnels et disponibles dans l'environnement immédiat (c'est-à-dire au sein de cadres tels que le département, le service ou l'équipe). Malheureusement, il arrive que les objectifs, les repères et références ne se trouvent pas sur le même plan, voire divergent, d'un cadre à l'autre, que l'on se place à des niveaux interpersonnels ou à des niveaux de plus grandes entités telles que des départements. La compréhension mutuelle et la collaboration peuvent donc être difficiles. De plus, les décisions, leurs raisons et leurs effets peuvent être oubliés. L'évaluation et la collecte de retours pour une intégration de l'expérience dans les processus de décisions futures pourraient améliorer l'apprentissage.

Si de nombreux outils, techniques et métiers répondant aux besoins locaux ou individuels se sont développés et ont été juxtaposés au fil des années, comment favoriser leur décloisonnement aujourd'hui pour servir au mieux les objectifs globaux ou collectifs ? Et comment intégrer et exploiter la connaissance qui peut émerger de ces collaborations combinant les différentes activités et expertises ?

Au sein de SHE, comme de tout groupe de grande taille effectuant une activité complexe, comment favoriser la collaboration et l'apprentissage organisationnel ?

La question de recherche étudiée peut donc être formulée de la façon suivante :

QR - Comment faciliter la prise de décision collective au sein d'une organisation impliquée dans des processus collaboratifs non prédéfinis pour les activités de maintenance ?

Elle implique comme sous-questions de recherche auxquelles des réponses seront apportées au long de ce manuscrit :

QR1 - Comment modéliser une organisation complexe de ce type ?

QR2 - Comment modéliser une décision collective pour ce type d'organisation ?

QR3 - Comment outiller la prise de décision collective dans ce contexte organisationnel ?

Cette recherche expérimentale vise à montrer l'importance du développement d'un jumeau numérique anthropocentré autoapprenant pour la maintenance des moteurs d'hélicoptère. Elle suit deux axes essentiels : la collaboration et l'apprentissage organisationnel. Elle suit également des principes de conception centrée sur l'humain. Non seulement concernant la place réservée à l'humain dans le fonctionnement du système faisant l'objet d'un prototypage mais également dans les méthodes de conception ainsi que les concepts exploités eux-mêmes. Elle se compose de plusieurs parties qui sont détaillées dans le point suivant.

1.4 Méthodologie de recherche

Le travail mené dans cette thèse s'inscrit dans une recherche industrielle donnant une part importante à l'expérimentation, d'autant plus que le système sur lequel elle aboutit est centré sur l'humain autant dans la finalité de son fonctionnement que dans sa conception.

Comme présenté dans la Figure 1.3, cette recherche débute par une étude bibliographique afin de définir le cadre théorique d'étude qui est pluridisciplinaire. Cette étude facilite la compréhension du cadre industriel qui est menée conjointement. Ces phases sont menées parallèlement, l'une guidant l'autre. L'étude bibliographique et l'analyse du contexte industriel conduisent respectivement à la définition d'un modèle d'organisation, permettant une lecture plus fine du terrain dont le fonctionnement est complexe. Cette observation de l'activité dans un cadre plus restreint permet de mettre en regard la réalité opérationnelle du terrain avec les concepts de la bibliographie et les éléments constituant le modèle. Dans ce cadre, des scénarios de cas réels de prises de décisions collaboratives qui ont eu lieu sont identifiés. L'objectif est de proposer une solution d'amélioration de la collaboration pour la prise de décision et l'apprentissage organisationnel. Vis-à-vis de cet objectif, ce modèle et ces observations permettent donc d'identifier l'étendue de l'existant, les fonctions et applications déjà mises en place et les éventuels manques. Ces phases permettent d'ancrer le modèle dans les pratiques réelles. Elles débouchent donc à leur tour sur l'élaboration de scénarios intégrant l'utilisation d'un prototype, qui soutiennent la conception et l'implémentation de cet outil. Le prototype constitue ensuite le support d'expériences concrètes pour mesurer son efficacité potentielle dans la résolution des problématiques. Ces expériences visent à tester la solution prototypée en conditions expérimentales de prises de décisions collaboratives réalistes créées à travers les scénarios élaborés. Pour ce faire, des outils d'évaluation et des protocoles sont proposés. Plusieurs métriques mesurées grâce à l'analyse des données qualitatives et quantitatives récoltées lors de ces expériences permettent d'évaluer l'efficacité de ce prototype dans la résolution des problématiques, pour valider ou invalider les hypothèses afin de conclure. Les détails de ces étapes sont répartis dans les prochains chapitres qui se succèdent selon l'ordre présenté dans la partie suivante.

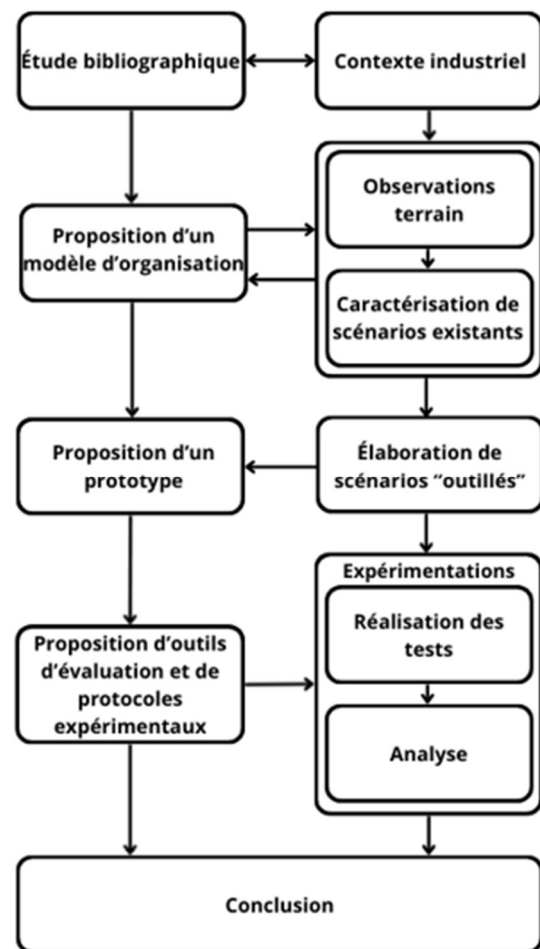


Figure 1.3 : Séquences méthodologiques de recherche.

1.5 Synthèse du chapitre 1 et plan de lecture

La quatrième révolution industrielle apporte des défis majeurs d'interopérabilité et de collaboration entre différentes disciplines. Pour surmonter ces défis, il est essentiel de développer une compréhension mutuelle et d'encourager l'empathie pour appréhender les diverses solutions et perspectives. Alors que la cinquième révolution industrielle se profile, l'accent est mis sur la personnalisation des services et un recentrage sur l'humain, visant à

réduire certains types de gaspillage, y compris la sous-utilisation des compétences humaines. Dans ce cadre, SHE, spécialisée dans la maintenance de moteurs d'hélicoptères, doit s'adapter à ces nouveaux enjeux. La maintenance de ces moteurs est une activité complexe qui englobe le diagnostic, l'analyse prédictive, la gestion des stocks, et nécessite une innovation continue pour optimiser les coûts et processus. Le département Service et Support de SHE doit composer avec la complexité cumulée des relations clients et des différentes configurations de moteurs, ce qui exige une approche pluridisciplinaire. Cette recherche explore le développement d'un jumeau numérique autoapprenant, conçu pour améliorer la collaboration et l'apprentissage organisationnel chez SHE, en intégrant des principes centrés sur l'humain autant dans l'utilisation de ce jumeau numérique que dans sa conception.

Les parties qui succèdent à cette introduction au sujet, au cadre et aux problématiques de recherche suivent l'organisation de la recherche détaillée dans la partie précédente. Elles s'organisent de la manière suivante :

- **Chapitre 2 : De l'organisation à la prise de décision collective.** Ce chapitre introduit les notions fondamentales sur lesquelles repose cette recherche. Il présente en premier lieu les approches théoriques relatives aux organisations, puis les apports des sciences cognitives à l'étude de la prise de décision collective. Les concepts de cognition collective et les spécificités des systèmes multi-agents (SMA) sont également discutés, ouvrant la voie vers leur utilisation comme support conceptuel à un cadre de modélisation pour l'aide à la décision collective.
- **Chapitre 3 : Proposition d'un cadre de modélisation pour la prise de décision collective.** La construction d'un modèle de système multi-agents est détaillée. Les modèles d'agent, d'agence et de prise de décision y sont décrits et discutés. L'applicabilité de ces modèles est analysée à travers l'exemple du jumeau numérique appliqué à l'organisation étudiée, ce qui permet d'envisager des améliorations et de valider leur pertinence.
- **Chapitre 4 : Proposition d'un environnement pour la prise de décision.** Ce chapitre expose la conception de l'environnement numérique, incluant les modèles implémentés et les outils d'évaluation mobilisés (utilisabilité, cognition collective, stigmergie). L'implémentation du prototype développé y est également présentée.
- **Chapitre 5 : Application – tests et validation.** La méthodologie expérimentale est détaillée, ainsi que les protocoles d'évaluation mis en œuvre. Les expérimentations portent notamment sur l'interface du système, l'effet des indicateurs stigmergiques et l'amélioration de la cognition collective. Les résultats sont analysés selon différentes dimensions qualitatives et quantitatives, puis discutés.

Conclusion générale, limites et perspectives. La conclusion met en évidence les apports de la recherche, en identifie les limites et propose des perspectives visant à approfondir et prolonger les résultats obtenus.

Chapitre 2 De l'organisation à la prise de décision collective

Ce chapitre a pour vocation d'explorer les travaux issus de la littérature scientifique en lien avec les questions de recherche. Ainsi, dans un premier temps, le concept d'organisation est étudié pour en identifier les caractéristiques nécessaires à sa modélisation en réponse à la question de recherche QR1 (Comment modéliser une organisation complexe ?). Ensuite, le concept de prise de décision collective est également analysé toujours dans un but de modélisation pour adresser la question de recherche QR2 (Comment modéliser une décision collective pour ce type d'organisation ?). La question de recherche QR3 (Comment outiller la prise de décision collective dans ce contexte organisationnel ?), relative à l'outillage nécessaire pour faciliter la prise de décision collective, sera étudiée ultérieurement, à partir du Chapitre 3. Toutefois les conclusions de ce chapitre permettent d'orienter la suite des travaux de recherche. Cette bibliographie s'étend de la notion d'organisation à la psychologie de groupe en passant par les sciences cognitives de manière plus générale, et couvre non seulement les aspects de l'objet d'étude lui-même qui est l'organisation, mais également les outils de réflexion. En effet, comme le rappelle le domaine pluridisciplinaire des sciences cognitives qui y est évoqué et sa philosophie, une étude implique l'objet étudié et l'observateur qui l'étudie. Ce dernier a tendance à en être négligé alors qu'il est constitutif de l'observation et ne peut pas en être abstrait (F. J. Varela et al., 1993).

2.1 Étude des organisations

2.1.1 Introduction

L'organisation est assimilable à un système complexe dans la mesure où celui-ci constitue une unité à travers ses composants et les relations mutuelles entre ses composants. Il se définit dans son ensemble par la manière dont ses composants sont en relation les uns avec les autres et non pas par les caractéristiques particulières de chacun de ses composants (F. G. Varela et al., 1974).

Cette dernière vision issue du domaine de la biologie peut être complétée par les définitions provenant de la science de gestion : une organisation se compose d'un réseau d'acteurs réunis autour d'une tâche et d'objectifs communs. Sa raison d'être est l'intégration de connaissances spécialisées dans cette tâche commune (Drucker, 1992). Dans le cas d'une entreprise, il s'agit de la fourniture d'un produit ou d'un service. Cette organisation est complexe puisque ses différents composants, ou organes, destinés à mener différentes fonctions peuvent être imbriqués, sont hétérogènes et ont un impact les uns sur les autres. Plus précisément, selon (Gélizé, 2020), la complexité permet de considérer l'organisation comme un système richement organisé ayant : une variété d'éléments ; un nombre indéfinissable d'interactions ; une prise de décision décentralisée ; une décomposition très difficile ; un comportement pouvant être imprévisible ; et une part d'incertitude.

L'étude de l'organisation peut également s'enrichir de l'apport selon lequel la grande entreprise peut être analysée comme un système complexe et ouvert (Le Moigne, 1990). Elle se compose d'un ensemble d'entités en interaction, échangeant à la fois entre elles et avec

leur environnement, et pouvant être décomposées en sous-systèmes hiérarchisés en niveaux. Une telle modélisation permet de saisir la structure interne de l'organisation tout en tenant compte des dynamiques externes qui l'affectent. Dans cette optique, l'entreprise ne peut être réduite à ses seules fonctions techniques ou économiques : elle apparaît également comme un espace habité par des communautés de femmes et d'hommes, dont les choix individuels influencent, à différents niveaux, les orientations de l'organisation. Ces interactions sont façonnées par les territoires dans lesquels elles s'inscrivent, révélant ainsi la nature fondamentalement située de l'action collective.

Cette lecture s'inscrit dans une critique des approches classiques de l'organisation, souvent limitées à trois dimensions analytiques — la description, la théorisation et la normativité — qui tendent à occulter la dimension humaine, sociale et territoriale de l'entreprise (Dumez, 2014). À l'inverse, une perspective communicationnelle et systémique permet de mieux comprendre les mécanismes qui régissent son évolution. Dans cette perspective, l'entreprise peut être pensée comme un champ d'application des idées développées par l'École de Palo Alto, à savoir une organisation traversée par des flux de communication (Picard & Marc, 2015), définie par les interactions dynamiques de ses éléments en fonction d'un but commun (Abell, 1978; Roumy, 2022). Ces interactions, en tant que conditions structurelles et fonctionnelles de l'organisation, participent pleinement de la complexité que celle-ci incarne.

Comme un système complexe est difficile à étudier (H. A. Simon, 1962), un outil intellectuel pour le rendre appréhendable par la pensée est nécessaire (Checkland, 1981). Cet outil est une manière de réfléchir au sujet d'un tel objet de réflexion.

Dans l'une des disciplines des sciences cognitives, la linguistique, il a été souligné que la métaphore ne sert pas uniquement la forme et l'esthétique de ce qui est communiqué, comme dans la poésie ou la rhétorique, mais est constitutive de la pensée humaine (Lakoff et al., 1985). La métaphore est l'appréhension d'un objet en termes d'autre objet. Certains objets de l'expérience vécue sont appréhendés métaphoriquement de manière systématique selon les cultures, comme le temps à travers le modèle de l'espace (passé ou futur « lointain », « horizons », « tenir le cap », ...) ou la discussion à travers le modèle de la guerre (« tirer à boulets rouges » pour critiquer sévèrement, « répliquer », « camper sur sa position », ...).

En particulier pour l'organisation, qui est un système complexe, différentes métaphores peuvent être utilisées avec pour chacune ses avantages et ses inconvénients (Morgan, 1999). Elles peuvent faciliter son étude ou aider à élaborer des approches en vue de sa manipulation. En plus des ressemblances recherchées dans la forme complexe permettant une vision sous un deuxième angle, si les qualités de l'image métaphorique correspondent aux qualités souhaitables pour l'objet de l'étude alors elle sera adaptée à la poursuite de ses objectifs. L'objet de cette étude est une organisation, et l'objectif est d'améliorer la collaboration et l'apprentissage organisationnel.

Parmi ces métaphores, de manière non exhaustive, se trouvent **l'organisation vue comme** :

- **Une machine** : l'entreprise peut se réduire à un ensemble mécanique de rouages. Cette vision réductionniste peut être assimilée au cognitivisme évoqué dans la Section 2.2.1. Si cette vision de l'organisation fait écho au taylorisme des siècles passés (Taylor, 1911), elle est bien toujours présente dans des pratiques actuelles telles que la

planification des tâches, la rationalisation des budgets dans lesquelles l'individu doit s'adapter. Cette conception est intéressante à considérer comme point de départ puisque c'est celle qui semble venir naturellement dans les pratiques historiques des grandes entreprises, bien qu'elle soit tacite. Cependant sa rigidité est peu adaptée à des conditions évolutives et laisse peu de place à la créativité, ce qui est particulièrement handicapant dans un domaine innovant ou de technologie de pointe (Fayol, 1918; Katz & Kahn, 2015; M. Weber, 1978) ;

- **Un organisme** : une analogie est faite avec un organisme vivant qui échange avec son environnement (Chester, 1938 ; Senge, 2006; Thompson, 2017) pour s'autoproduire, c'est-à-dire se maintenir en vie, avec un accent sur les aspects d'interdépendance des besoins et sur la « cocréation » (F. G. Varela et al., 1974). Ceci règle la question de l'adaptation mais peut représenter un degré de liberté difficilement applicable en pratique dans un contexte très règlementé qui comporte des procédures strictes à cause d'enjeux de sécurité ;
- **Un cerveau** : une comparaison est faite entre l'organisation et un cerveau (Forrester, 1997 ; Mintzberg, 1979; Weick & Weick, 1995), avec des informations qui circulent et sont traitées pour influencer les actions menées. Ceci est intéressant dans la mesure où un accent est mis sur les aspects de communication, de décision et d'apprentissage organisationnel. Pour ces raisons, cette image sera celle retenue pour répondre à la problématique de cette étude dont les aspects de collaboration et d'apprentissage organisationnel correspondent à ceux qu'elle favorise. Elle n'entre pas en contradiction avec la précédente mais est plutôt une spécialisation. Cette métaphore peut donc négliger, comme celle de l'organisme, les aspects de processus nécessaires, de procédures obligatoires ou d'autres structures à considérer. Mais le modèle utilisé peut permettre de traiter cet inconvénient de manière satisfaisante en assurant une certaine autonomie des parties intégrant le modèle (Beer, 1995). Les franchises d'une chaîne de restaurants, les bureaux ou filiales d'une ONG ou d'une multinationale, les équipes agiles d'une entreprise du domaine de la technologie, les départements d'une université sont autant d'exemples de parties autonomes contribuant à un objectif commun.

La métaphore du cerveau paraît idéale pour la problématique abordée. Le cerveau permet d'assurer en particulier des fonctions cognitives comme la conscience de situation, la prise de décision par la collaboration de différentes régions assurant diverses fonctions, ainsi que l'apprentissage. De ce fait, d'une part, il est aisé de faire l'analogie entre cerveau et organisation, et, d'autre part, le cerveau convient particulièrement à cette recherche appliquée puisqu'il comporte précisément les caractéristiques recherchées au sein de l'organisation comme la conscience de situation, l'adaptation au changement, la résolution de problèmes complexes, la mémoire et l'apprentissage.

Cette partie a explicité la métaphore du cerveau à travers laquelle l'organisation doit être examinée sachant les points soulevés par la problématique. L'explication de l'utilisation même d'une métaphore s'appuie sur l'une des disciplines des sciences cognitives en particulier qu'est la linguistique. Mais le choix de cette métaphore, lui, met en exergue la nécessité de s'appuyer de manière plus générale sur les sciences cognitives afin de l'exploiter au mieux

dans ses différents aspects. C'est le rôle de sections suivantes. Dans un premier temps, un développement doit être fait dans la présente section concernant la capacité de l'organisation à apprendre, précisément.

2.1.2 Organisation apprenante

Une organisation apprenante est une organisation qui encourage l'apprentissage et le développement continu parmi ses membres (Pedler et al., 1991) pour faire perdurer sa croissance. Ceci nécessite des éléments clés comme un environnement qui favorise l'apprentissage, ainsi que des processus, des pratiques d'apprentissage et une gestion qui renforce l'apprentissage (Garvin, 1993) pour améliorer continuellement les capacités de l'organisation. Les organisations apprenantes sont celles qui sont capables de créer et transférer activement des connaissances (Nonaka & Takeuchi, 1995). Pour faire en sorte qu'une organisation soit apprenante, il est nécessaire d'apporter des changements à la fois d'ordre technique et culturel, et une place prépondérante est souvent accordée au management et à la culture (K. E. Watkins & Marsick, 1993).

Mais au-delà d'un environnement favorable pour les individus, une organisation étant un système complexe, il est important d'adopter une pensée systémique concernant cette problématique (P. M. Senge, 1990). La maîtrise personnelle mais également des modèles mentaux partagés, une vision commune et un apprentissage en équipe sont les piliers d'une organisation apprenante. L'apprentissage organisationnel, comme l'apprentissage des individus en général, consiste en un processus de détection et de correction des erreurs, mais focalisé sur le niveau organisationnel et ses objectifs comme les stratégies et actions menées. Comme pour les individus, l'apprentissage est un processus qui s'exerce sous une forme cyclique de remise en question pour l'amélioration par l'expérience (Dixon, 1999). Mais dans le cas de l'organisation, composée d'individus, ce cycle prend la forme d'une double boucle dans laquelle l'individu peut analyser le retour de son action, mais également l'organisation qui l'entoure (Argyris & Schön, 1997). Cette double boucle peut être utilisée pour concevoir des environnements numériques facilitant non seulement le partage d'informations et de connaissances entre des acteurs d'une organisation (première boucle), mais aussi la capitalisation à long terme de connaissances portant sur des règles métiers ou des décisions reproductibles sous certaines conditions (deuxième boucle), comme dans (Merlo, 2003). Ainsi l'organisation et l'individu peuvent se remettre en question et progresser. Pour évaluer si l'environnement est favorable à l'apprentissage, les auteurs de (Garvin et al., 2008) alertent cependant sur le fait que les organisations ne sont pas monolithiques et que l'apprentissage est multidimensionnel, ce qui soutient l'importance d'un modèle modulaire. De plus, dans l'évaluation, des comparaisons sont nécessaires plutôt que de se contenter de valeurs absolues puisque les individus ont tendance à plus ou moins bien noter certains aspects de manière générale (Garvin et al., 2008). Par exemple, l'ouverture aux nouvelles idées a tendance à être très bien notée, quelle que soit l'organisation (Garvin et al., 2008), ce qui souligne l'importance d'évaluations comparatives plutôt qu'absolues.

L'apprentissage organisationnel est un processus complexe où la création et le partage des connaissances dans l'organisation sont centraux. Il implique le niveau individuel et le niveau

collectif en même temps (Easterby-Smith & Araujo, 1999). Il s'agit donc de se préoccuper du lien entre ces deux niveaux. C'est l'objectif des modèles de double boucle d'apprentissage ajoutant l'organisation elle-même en plus de l'individu dans cette boucle d'expérimentation, observation et évaluation (Kim, 1993). Ces modèles restent cependant de haut niveau et il reste à définir exactement comment les informations se transmettent et sous quelles formes. L'idéal est d'adopter un format le plus universel possible pour un maximum de flexibilité quant aux sujets traités.

Il est important de prendre en compte à la fois le niveau individuel et le niveau organisationnel car :

- D'une part, l'oubli des individus qui composent l'organisation, sachant que l'organisation apprend à travers ces individus, mènerait à l'assimilation de l'organisation à un individu. Cet anthropomorphisme se traduirait par une transposition simpliste du modèle d'apprentissage d'un individu à l'organisation (Kim, 2009) ;
- D'autre part, la seule prise en compte des individus de manière indépendante les uns des autres est également insuffisant. Par exemple, plusieurs médecins qui font un diagnostic ensemble donnent un bon diagnostic plus souvent qu'un seul médecin, même quand il est spécialiste du sujet en question (Barnett et al., 2019).

Cette partie montre qu'une organisation, pour être apprenante, doit développer activement cette caractéristique en développant un environnement favorable à l'apprentissage, notamment par la création et l'échange facilités d'information, en adaptant l'organisation et le management. Mais une vision systémique est également utile avec une notion cyclique issue du domaine de l'apprentissage, appliquée à l'organisation. Cependant, pour éviter une application simpliste du fonctionnement d'un individu à l'organisation, les niveaux individuel et organisationnel doivent être pris en compte simultanément, en établissant un lien entre eux. La partie suivante aborde la nécessité d'une adaptation de la structure-même de l'organisation autour de ses objectifs et des moyens qui lui sont consacrés.

2.1.3 Structure de l'organisation

La théorie classique de l'organisation, appliquée en particulier aux entreprises, est décrite depuis longtemps (Fayol, 1918) à travers les différents types d'opérations qu'elle doit pouvoir assurer : les opérations techniques, commerciales, financières, de sécurité, de comptabilité et d'administration. Elle donne une place prépondérante à la hiérarchie et développe donc en particulier ce que signifie administrer : prévoir, organiser, commander, coordonner, contrôler.

Ce n'est que plus tard avec la complexification de la société et du contexte d'évolution des entreprises que les définitions se flexibilisent et qu'est adoptée la théorie de la contingence qui stipule que l'organisation doit s'adapter à son environnement concernant sa structure (Galbraith, 1973; Lawrence & Lorsch, 1967; Woodward, 1965). Selon cette théorie, il n'existe pas de recette générale pour structurer l'organisation. Tout dépend des conditions externes et internes.

Des pans de la littérature se concentrent sur différents aspects précis de la contingence. Concernant la théorie de la contingence structurelle (Donaldson, 2001; Galbraith, 2002), cela peut outrepasser la vision hiérarchique pyramidale classique qui serait nécessaire et l'élément clé de l'activité. Au contraire, la structure de l'organisation doit s'adapter aux exigences spécifiques de l'environnement, des technologies utilisées et de la taille de l'organisation. Une vision plus organique de la structure peut être envisagée et pas seulement mécanique. Un accent peut être mis sur les éléments extérieurs comme la théorie de la contingence des ressources (Pfeffer & Salancik, 2003) qui met l'acquisition et la gestion des ressources de l'environnement de l'organisation au cœur de sa survie. Au contraire, un accent peut être mis sur les éléments intérieurs et en particulier la technologie utilisée, comme la théorie de la contingence de la technologie (Thompson, 2003; Tushman & Nadler, 1978). En effet, même si une culture interne est développée et peut influencer sur la façon dont l'organisation fonctionne (Schein, 2010) du fait de leurs normes, croyances et valeurs, les technologies utilisées peuvent quant à elles nécessiter de profonds changements organisationnels pour être exploitées au mieux.

Ces notions sont importantes car elles soulignent le fait que l'organisation et son agencement dépendent des fonctions qu'elles doivent assurer et des conditions auxquelles elles sont soumises. L'attachement à une structure rigide n'est pas idéal et peut entraver son adaptabilité.

2.2 Sciences cognitives

La partie précédente a explicité des métaphores souvent faites implicitement ou inconsciemment et a permis de déterminer l'une d'entre elles qui est la plus opportune : celle du cerveau. Effectivement, le cerveau est un organe central quant aux fonctions cognitives chez les êtres vivants qui se déplacent et doivent donc s'adapter rapidement à leur environnement. Cela comprend des processus complexes comme la perception, la mémoire, l'apprentissage ou la prise de décision.

Ces fonctions cognitives font l'objet d'un champ d'étude : les sciences cognitives. Ce champ pluridisciplinaire (philosophie, linguistique, anthropologie, neurosciences, intelligence artificielle, psychologie) étudie la cognition, c'est-à-dire les processus mentaux de haut niveau tels que la perception, la mémoire, le raisonnement (Vignaux, 1991) et qui supportent de manière générale l'acquisition de connaissances. Certaines notions des sciences cognitives sont utiles pour répondre à la problématique puisqu'elles consistent à comprendre le fonctionnement de l'humain : son esprit, ses perceptions, son apprentissage et ses agissements. Les différentes disciplines qui composent les sciences cognitives s'expliquent donc par le fait que :

- La philosophie soulève les questions sur la nature de l'esprit et de la connaissance. Elle explore les théories et concepts fondamentaux sous-jacents à la compréhension des processus mentaux ;

- La linguistique étudie le langage qui est non seulement un outil de communication mais également un aspect central de la cognition. Il s'agit d'un moyen de structurer la pensée, comme vu dans la partie précédente avec les métaphores ;
- L'anthropologie étudie l'influence des contextes sociaux et culturels sur les processus cognitifs et agissements humains. Ces travaux de recherche se veulent anthropocentrés, c'est-à-dire centrés sur l'humain ;
- Les neurosciences explorent les supports biologiques, c'est-à-dire physiques des processus mentaux ;
- L'intelligence artificielle cherche à reproduire ces processus dans des machines. Elle représente donc une mise en application des théories. Cela permet de les mettre à l'épreuve pour les affiner et accélère donc la compréhension des processus naturels ;
- La psychologie étudie les processus à un plus haut niveau que les neurosciences. Alors que les neurosciences étudient ces processus au niveau physique et moléculaire, la psychologie les examine à un niveau plus fonctionnel et macro. Elle comprend l'étude de la perception de l'individu de son environnement, ses prises de décisions et ses interactions avec cet environnement.

À défaut de pouvoir présenter l'entièreté des sciences cognitives qui représentent un domaine vaste, trois courants de pensée issus des sciences cognitives sont décrits ci-après afin de progresser dans la compréhension et l'étude des organisations.

Leur compréhension est cruciale dans l'environnement industriel car la recherche transdisciplinaire permet l'ingénierie cognitive (Boy, 2003). Celle-ci vise à adapter la technologie à l'humain plutôt que l'inverse, pour mieux l'aider, en combinant les connaissances sur l'homme, la technologie et les relations entre eux.

2.2.1 L'approche cognitiviste

Le cognitivisme est basé sur l'hypothèse que la cognition est une manipulation de symboles permettant d'obtenir des réponses adaptées à la situation rencontrée (Pylyshyn, 1986). La gestion des connaissances (Matta et al., 2002) est un exemple d'application industrielle de ce courant.

Ce courant a l'avantage de se manifester sous forme d'applications assez généralistes pour englober des activités de spectre large et contenant de nombreuses sous-activités de nature hétérogènes. C'est le cas de la gestion de connaissance qui peut épouser toute forme d'activité et de structure. Cependant, les applications issues de ce courant présentent le grand inconvénient d'être rigides et peu intégrées dans l'activité qu'elles supportent. Ainsi, elles sont peu robustes et sont vulnérables aux situations imprévues et aux informations manquantes. De plus, ce manque d'intégration favorise cette incomplétude puisque leur mise à jour dépend de la volonté des collaborateurs et non directement de leur activité.

Métaphore 2.1

En comparaison du cerveau, tenant lieu de référence, l'adaptabilité et la dimension généraliste est donc bien présente. Mais le manque de robustesse qui se traduit par une vulnérabilité aux manques d'information et aux détériorations partielles est handicapant. D'ailleurs, le cerveau se caractérise au contraire par une grande robustesse comme l'ont montré des expérimentations sur des souris qui conservaient des performances cognitives relativement normales même avec des destructions de certaines régions cérébrales allant jusqu'à 90% (Lashley, 1929). Tant que certaines zones bien spécifiques et critiques n'étaient pas touchées, les capacités testées, d'apprentissage et de mémoire, étaient assurées malgré les pertes. Ces pertes de matière dans la plupart des zones pouvant être compensées par les autres. Ce manque de robustesse est regrettable dans le contexte d'une entreprise évolutive et soumise à des imprévus.

2.2.2 L'approche connexionniste

Le connexionnisme repose sur l'hypothèse selon laquelle la cognition est l'émergence d'états globaux (réponses attendues) de réseaux d'éléments uniques (tels que les neurones) (Hebb, 2005). L'apprentissage automatique (Carvalho et al., 2019) est un exemple réussi d'application du connexionnisme pour des tâches telles que la reconnaissance d'images et la reconnaissance du langage naturel.

Cela a l'avantage de bien s'intégrer dans l'activité au service de laquelle cette philosophie et ses applications sont mises en place. De plus, à l'instar du cerveau, il présente une grande robustesse quant à l'imprévu ou la détérioration partielle. Cependant, cela présente tout de même des inconvénients. Son cadre d'application reste restreint et ses tâches très spécifiques. Dans l'exemple d'une reconnaissance d'images par un réseau de neurones artificiels, qui est une des applications de l'apprentissage automatique, l'environnement, le type d'images et de reconnaissance souhaitée sont bien définis et maîtrisés. Dans le cas d'un léger changement sur la nature de la tâche ou des conditions, de nouveaux paramétrages et dimensionnements sont nécessaires de la part d'un ingénieur qui en est responsable. Bien qu'intéressant pour des tâches laborieuses et répétitives, cet aspect spécialisé des tâches cognitives assurées s'éloigne du niveau généraliste du cerveau.

Cette limite est problématique dans le contexte d'une organisation comprenant des activités hétérogènes et bien distinctes. Pour l'étudier, la piloter ou l'améliorer, cela ne suffit pas à la prendre en compte dans son entièreté mais n'apporte que des solutions locales, dans des cadres restreints.

Métaphore 2.2

Comparativement au cerveau, la robustesse et l'efficacité sont donc bien présentes tant que l'on se cantonne dans le cadre de la tâche pour laquelle ce modèle est mis en application, par exemple à travers un système comme un réseau de neurones artificiels. Cependant, il apparaît clair que cette surspécialisation l'éloigne de la puissance du cerveau dans la résolution de problèmes imprévus, en grande partie due à son aspect généraliste.

2.2.3 Hybridation des approches

La modularité, décrite dans la « *société de l'esprit* » (Minsky, 1986) , correspond à une hybridation du cognitivisme et du connexionnisme. Les différentes fonctions cognitives sont réalisées par différents agents. Un agent correspond à une fonction, qui sait résoudre un type de problème à petite échelle. Pour un problème à plus grande échelle, plusieurs agents liés entre eux seront nécessaires, ce groupe d'agents forme une agence. Cela apporte une considération multi-niveau, car chaque agent, avec son organisation interne, peut être considéré lui-même comme une agence. Le fonctionnement de la cognition est donc considéré comme une société. Ce type de fonctionnement donne accès, du fait de sa flexibilité et sa décentralisation, à la résolution de problèmes plus complexes et imprévus.

Métaphore 2.3

Ce modèle modulaire fait d'agents interdépendants, éventuellement regroupés en agences, semble correspondre à la complexité du cerveau et permettre de rivaliser avec l'étendue de ses capacités et de son potentiel. Mais si la théorie est très séduisante, l'application de ce genre de modèle est compliquée dans la pratique (Brooks, 1991). En effet dans le cerveau, la flexibilité permise par ce modèle est bien soutenue par le support physique que représente le réseau neuronal. En fonction des besoins, le rôle alloué aux différents neurones peut évoluer. Cela assure la plasticité du système nerveux qui s'adapte donc aux besoins. Ce système est sophistiqué et n'est donc pas évident à transposer au problème de l'organisation. La question de la définition des agents se pose au sein de l'organisation.

2.3 Synthèse : le choix des SMA

La théorie de Minsky sur la mise en œuvre de la cognition humaine a donné naissance aux systèmes multi-agents qui permettent de modéliser et de simuler l'intelligence collective. Une colonie de fourmis, un banc de poissons ou une nuée d'oiseaux en sont des exemples visuellement remarquables. Les individus qui interagissent dans leur environnement sont autonomes, du moins partiellement. Mais les règles relativement simples que ces agents suivent individuellement conduisent à des organisations très sophistiquées au niveau collectif. Comme l'entreprise peut être vue comme un système de systèmes (Gorod et al., 2008; Popper et al., 2004) une modélisation de ce système complexe par un système multi-agents (SMA) peut aider à concevoir un système permettant l'intégration des connaissances de l'entreprise (Merlo & Girard, 2004).

En complément, il faut noter que la littérature récente en psychologie organisationnelle confirme la nécessité de la réflexivité des acteurs de l'entreprise sur leur autonomie dans la construction des problèmes, notamment en ingénierie (Vannereau & Lemaître, 2020). Il est donc cohérent de proposer un système basé sur un modèle multi-agents donnant un outil de réflexivité qui reproduit numériquement l'organisation multi-agents réelle et les liens en son sein (Rzevski et al., 2022).

2.4 Étude de la prise de décision collective

2.4.1 Définitions

La décision est une activité humaine fondamentale, présente dans la vie quotidienne, qu'elle soit consciente ou inconsciente. Dans le cadre de la gestion de systèmes complexes, elle devient une opération non triviale, nécessitant une compréhension approfondie des phénomènes cognitifs sous-jacents. La décision est généralement définie comme « le processus de faire des choix » (Cambridge University Press, 2025), et consiste à sélectionner la meilleure option parmi un ensemble de possibilités (Beach, 1993). Cette capacité humaine varie selon les situations, ce qui a conduit au développement de plusieurs modèles pour en caractériser les mécanismes.

Simon (1960) distingue deux types de processus décisionnels : les décisions structurées, où les étapes du processus sont clairement identifiées, et les décisions non structurées, qui ne suivent pas un schéma prédéfini. Ces dernières sont décrites comme un ensemble d'actions et de facteurs dynamiques, débutant par l'identification d'un stimulus et se terminant par un engagement spécifique à agir (Mintzberg et al., 1976). Ce type de décision est particulièrement pertinent dans les environnements industriels ou opérationnels, où les acteurs peuvent être confrontés à des situations imprévues.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la prise de décision humaine, des modèles ont été élaborés dans différents domaines. L'analyse de ces modèles permet de mieux cerner les étapes du processus décisionnel et d'identifier les leviers d'amélioration.

- Du point de vue psychologique, la décision peut être envisagée comme un processus éthique visant à apporter une réponse appropriée à une situation problématique. Craft (2013) propose un modèle en quatre étapes : identification de la situation, définition de la solution, évaluation de la solution et application de celle-ci. Ce modèle met en évidence l'importance de sa capacité à intégrer des considérations morales dans le processus décisionnel. Il met également en évidence que le phénomène cognitif de la conscience situationnelle joue un rôle central. Elle correspond à la capacité du décideur à percevoir, comprendre et anticiper les éléments d'une situation donnée, et constitue la base sur laquelle repose l'ensemble du processus de décision.
- Dans le champ de l'étude des organisations, Mintzberg et al. (1976) décrivent la décision comme un processus structuré en trois phases : identification du problème, développement des solutions possibles et sélection de la meilleure solution. Ce modèle insiste sur la nécessité de structurer les étapes du raisonnement pour aboutir à une décision efficace, en tenant compte du contexte technique et organisationnel.
- En génie industriel, la méthode GRAI (Merlo, 2003; Merlo & Girard, 2004) propose une modélisation du système décisionnel d'une entreprise. Elle définit la décision comme une opération de choix structurée, située dans un cadre hiérarchique (stratégique, tactique, opérationnel) et temporel (court, moyen, long terme). Chaque décision est caractérisée par son objet (ex. planification, organisation), son horizon, sa fréquence

et son niveau. La matrice de décision GRAI permet de représenter ces éléments en croisant les niveaux hiérarchiques et les horizons temporels.

Ces travaux étant anthropocentrés, le point de vue psychologique est essentiel. De plus, l'analyse de l'objet d'étude à travers la métaphore du cerveau rend cette vision d'autant plus pertinente. Elle correspond à ses fonctions indispensables. L'objet d'étude en question étant l'organisation, la littérature du domaine des organisations vient compléter la notion de décision, avec l'accent nécessaire qui est mis sur le contexte. Enfin le domaine du génie industriel met en lumière certains points d'amélioration possibles qui sont éloignés du cadre individuel quotidien comme le cadre temporel de long terme.

2.4.2 La conscience de situation

Dans le processus décisionnel, la décision qui précède l'action (ou la non-action) est elle-même, idéalement, précédée d'une conscience de situation et des mécanismes qui lui sont nécessaires (Klein, 1993).

La conscience de situation, définie par Endsley comme la perception des éléments d'un environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche, est reconnue comme un enjeu majeur dans les domaines critiques tels que l'aviation, la gestion de crise et la sécurité industrielle, comme le souligne (Endsley, 1995) et les recherches qui s'appuient sur son modèle de conscience de situation (Gaba et al., 1995). En effet, comme le montre la Figure 2.1, elle conditionne la prise de décisions efficaces et la prévention d'erreurs dans des environnements complexes et dynamiques.

Elle pose les conditions nécessaires à une prise de décision éclairée. À la suite de cette décision et des actions qui en résultent (qui dans le cas de la maintenance peuvent aussi bien être une abstention d'action), une modification de l'état de l'environnement s'exerce en fonction de la performance de ces actions. Une mesure de cette performance peut aider à clarifier la conscience de situation.

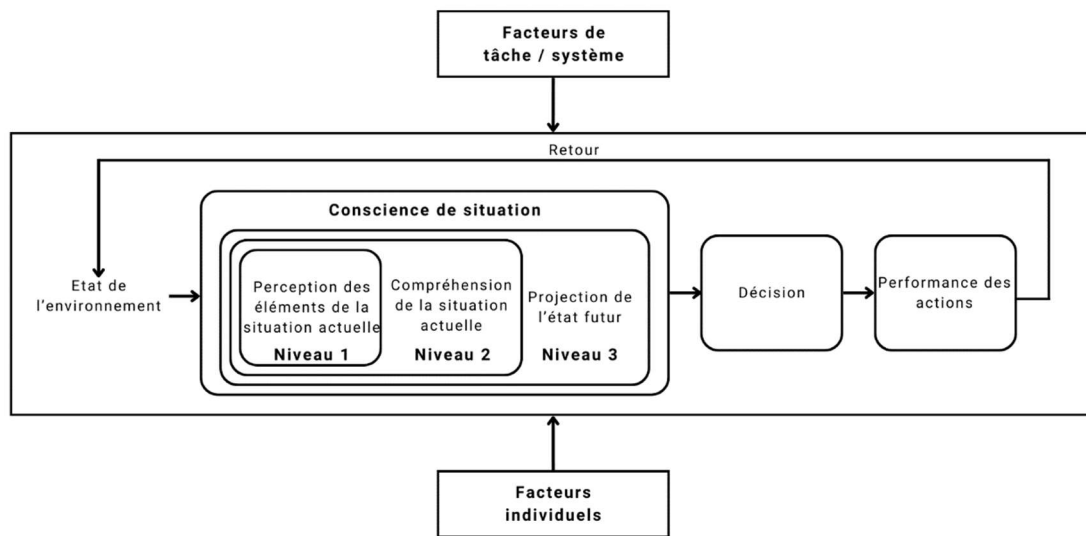


Figure 2.1 : Modèle de conscience de situation dans la prise de décision dynamique adapté de (Endsley, 1995)

Cette représentation de la prise de décision intégrant la conscience de situation souligne les éléments importants du processus qui peuvent être plus ou moins favorisés par les caractéristiques, d'une part, de l'individu prenant ces décisions et, d'autre part, de la tâche ou du système en jeu. Les facteurs individuels, qui comprennent des éléments comme les compétences et la mémoire, semblent ici admis comme étant gérés par un individu. Cependant, cette représentation ne prend pas en compte les mécanismes nécessaires dans le cas où ce processus serait distribué sur plusieurs individus.

Dans certaines situations, il se peut que les différentes étapes ne soient pas assurées par la même personne, voire qu'une seule et même étape soit assurée par plusieurs personnes. C'est le cas dans des secteurs faisant intervenir des experts hautement spécialisés. Par exemple, dans le milieu médical un patient peut avoir à faire un choix potentiellement lourd de conséquences et peut être éclairé dans ce choix par les spécialistes de la question. Le patient ne possédant initialement pas toujours une conscience de la situation suffisante pour prendre sa décision, il a été établi un modèle de délibération qui précède la décision (Elwyn et al., 2012). Ainsi, la personne responsable de la décision, ici le patient, peut choisir de manière éclairée grâce à l'aide reçue des spécialistes pour peser les avantages et inconvénients de chaque option possible en comblant les éventuelles lacunes dans ses connaissances. La Figure 2.2 présente les différentes étapes de cette délibération permettant d'éclairer la décision : la discussion du choix à effectuer, la discussion des différentes options qui se présentent et enfin celle de la décision finale.

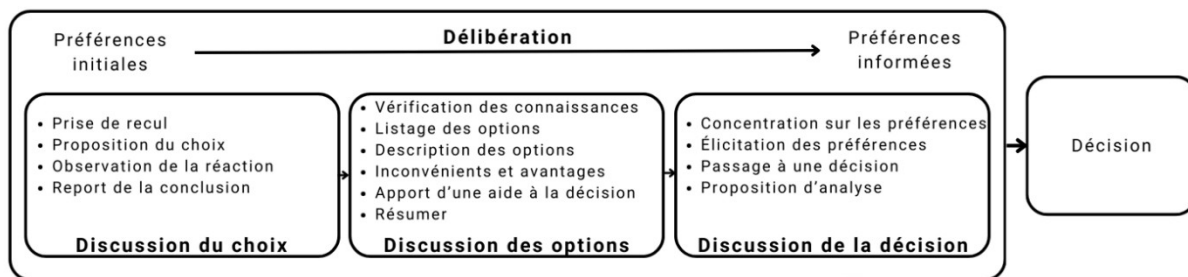


Figure 2.2 : Décision partagée, adapté de (Elwyn et al., 2012)

Cet exemple montre que certaines décisions peuvent être améliorées par la mise en relation de différents spécialistes et qu'il est possible de mettre en place des mécanismes pour coordonner le savoir de plusieurs personnes pour prendre une décision dont le cadre et les conséquences sont complexes. Il s'agit dans ce contexte médical d'une collaboration de quelques personnes seulement. Pour appréhender des situations en présence d'un nombre plus important d'intervenants, la partie suivante présente un examen plus approfondi des enjeux des activités de groupes.

2.4.3 Le collectif lors de la prise de décision

2.4.3.1 Les trois types de prise de décision collective

Comme vu précédemment, la conscience de situation est importante dans la prise de décision puis l'action. De plus, lorsque ces différentes étapes se répartissent sur plusieurs humains, voire machines, la mise en place de mécanismes de collaboration est nécessaire. Les présentes recherches s'intéressent donc à un cadre collaboratif. Selon (Seguy et al., 2010), la collaboration consiste en une production avec partage de la production, des ressources, des bénéfices ou des risques. La prise de décision dans un contexte de collaboration consiste donc en une telle production débouchant sur une décision. Trois types de prise de décision dans un contexte collectif ont été identifiées : la codécision (implication des acteurs dans une décision conjointe avec partage des ressources, objectifs), la décision coopérative (simple juxtaposition des activités de chacun sans partage d'objectif) et la décision collaborative (partage de la production et des objectifs). La décision collaborative porte un sens plus large que la codécision dans la mesure où il peut y avoir différentes configurations en fonction du pouvoir de décision de parties prenantes, de leur expertise et de la complexité de la prise de décision. Par exemple, une seule partie peut prendre la décision finale après consultation. C'est donc cette forme qui est retenue dans cette recherche. Les modes de collaboration peuvent varier selon les contraintes dans l'espace (présentielle ou distancielle) et dans le temps (synchrone ou asynchrone). Dans des travaux sur le sujet de la prise de décision collaborative dans le milieu de l'élevage de précision, les auteurs de (Villeneuve et al., 2019) soulignent qu'un système d'aide à la décision dans un tel milieu collaboratif doit impérativement être flexible et adaptable. Ils mettent en avant le fait que le partage de l'information entre les parties prenantes ne suffit pas : il faut que l'information soit comprise.

Chaque partie doit donc être incluse dans un réseau prévu à cet effet. La réussite de l'intégration d'individus, notamment issus d'un groupe tiers, dans une activité collaborative

peut être conditionnée à l'accès à des informations personnelles les concernant. Cela leur permet d'être perçus en tant qu'individus et de passer outre des préjugés liés à leur groupe d'appartenance ou à leur distinction hiérarchique qui n'est pas forcément pertinente dans ce contexte, pour favoriser la collaboration (N. S. Miller & Brewer, 2013). Cependant, ce type d'information est à manipuler avec précaution. De manière générale, la présence d'autres personnes dans les tâches accomplies joue un rôle sur la motivation de chaque individu, et de nombreuses recherches ont été faites à ce sujet (Vasiljevic et Oberlé, 2016).

2.4.3.2 Motivation et paresse sociale

Lorsqu'il est impossible pour les sujets d'identifier leur contribution parce qu'elle est combinée à celle d'autres participants, le lien entre l'effort personnel fourni et le résultat est rompu, ce qui provoque une démotivation (Harkins, 1987). Cette démotivation, ou paresse sociale, se développe à une double condition : quand les productions ne sont pas identifiables et que les participants croient qu'elles ne sont pas non plus évaluables (Harkins & Jackson, 1985).

Parmi les facteurs possibles à l'origine de ceci, se trouvent les façons dont les membres perçoivent leur propre contribution et celle des autres membres à l'effort de groupe :

- Leur propre contribution peut ne pas sembler indispensable : sans feed-back sur la contribution individuelle, elle peut sembler superflue dans la production collective, surtout si les collaborateurs sont perçus comme ayant les compétences nécessaires, comparé à des individus qui travaillent seuls (Kerr, 1983; Kerr & Bruun, 1981) ;
- La suspicion que les autres en profitent pour fournir moins d'efforts : quand les autres sont perçus comme compétents (vu les essais précédents) tout en étant mauvais au moment présent, ce qui suscite une suspicion qu'ils ne contribuent pas autant qu'ils le pourraient (Kerr, 1983) ;
- Les normes de groupe : une « norme de freinage » peut être mise en place pour contrecarrer l'augmentation permanente des cadences imposées par la direction. Les rares travailleurs qui refusent de réduire leur effort à la moyenne (matching of effort), préférant satisfaire la hiérarchie, peuvent être ostracisés (Roethlisberger & Dickson, 2003).

Tous ces constats sont à prendre en considération dans la détermination des informations qui doivent être accessibles et/ou échangées ou non entre les différents acteurs. Il faut rester vigilant sur le fait que certaines connexions et représentations peuvent s'avérer contreproductives.

De manière générale, les facteurs responsables de la paresse sociale sont générés lors des travaux en groupe. Cette paresse sociale peut être surmontée. Un dispositif permettant d'évaluer les contributions individuelles à l'effort collectif suffit à supprimer l'effet de paresse sociale. Mais même si le dispositif suffit à éliminer la paresse sociale, d'autres solutions ont également été étudiées concernant la motivation dans un travail en groupe. Ces solutions alternatives sont tout de même à prendre en considération pour des raisons détaillées dans le point suivant. Les efforts doivent être rentables, c'est-à-dire mener à une évaluation

positive, qu'il s'agisse d'une auto-évaluation ou d'une évaluation de la part des autres membres du groupe, avec quelques subtilités à prendre en compte tout de même :

- Ne plus être repéré comme étant le plus mauvais du groupe motive à se surpasser (effet Köhler). Cet effet est vrai à condition que la comparaison entre sa propre performance et celle des autres ne semble pas montrer une différence trop importante, auquel cas l'estimation de l'effort à fournir pour atteindre un résultat comparable aux meilleurs que soi peut s'avérer décourageante (Köhler, 1927) ;
- La tâche doit représenter un défi intéressant qui permet d'améliorer l'image de soi. Dans ce cas, la norme de freinage, ou 'matching effort' vu précédemment peut faire place à un processus de *compensation sociale* dans lequel ceux qui se sentent plus performants fournissent plus d'efforts pour compenser le défaut des moins performants et assurer au groupe de bons résultats (Huguet et al., 1999) ;
- Une compétition intergroupe peut motiver à faire gagner son groupe lorsque le jeu est de battre d'autres groupes par rapport aux groupes travaillant seuls. L'appartenance à un groupe valorisé fait partie d'une identité sociale positive de l'individu (Tajfel & Turner, 2004). Il a été montré que des groupes possédant des tee-shirts de même couleur étaient les plus performants lors d'expériences dans lesquels ils ont été placés en situation de compétition les uns par rapport aux autres (Worchel et al., 1998).

2.4.3.3 *Surveillance et autocensure*

Il est ressorti du point précédent que la simple mise à disposition générale d'une identification des membres du groupe et des informations sur leur contribution comme son contenu ou la quantification de celle-ci, peut supprimer l'effet de démotivation. Cependant, l'identification individuelle des acteurs industriels par les autres, vis-à-vis de leurs retours, peut poser un problème organisationnel. À cause du risque que les informations données par l'individu soient utilisées pour d'autres raisons par des personnes tierces (comme l'évaluation de son travail), il peut s'autocensurer. L'anonymat pourrait donc contribuer à obtenir des informations plus réalistes (R. Weber et al., 2001).

La conception d'un espace d'interactions via des interfaces permettant de gérer ces paramètres en les modulant en fonction des besoins et contextes serait donc avantageuse pour favoriser les communications tout en limitant leurs effets indésirables. En effet, la visibilité des contributions des collaborateurs semble assurer une participation correcte aux activités du groupe auquel ils appartiennent. Cependant, les connexions de ce groupe avec d'autres groupes ou avec le niveau supérieur auquel il appartient, que ce soit sur le plan organisationnel ou hiérarchique, ne doivent pas nécessairement être de même nature. Elles peuvent être plus lâches, c'est-à-dire moins fréquentes ou impliquer des données d'un plus haut niveau de granularité par exemple (agglomérées, donc anonymisées). Cette gestion adaptative permet de se prémunir contre des effets pervers tels que l'autocensure et la surveillance qui peuvent s'engendrer mutuellement et porter atteinte autant au bien être qu'aux performances collectives et à leur amélioration.

2.4.4 Caractéristiques de la cognition collective

Dans la partie précédente concernant la collaboration et la psychologie en groupe, différentes configurations et situations ont été évoquées et induisent des comportements souhaitables ou non. Cela soulève différents points à prendre en considération dans une organisation concernant le travail de groupe. En revanche, il s'agit ici d'une vision centrée sur l'individu. Or, ce travail de recherche vise une prise en compte plus holistique de l'organisation pour une gestion globale vers des objectifs communs. Mais cette gestion du tout commence par celle de la partie et il est à ce stade déjà possible d'apercevoir des pistes de gestion holistique, par exemple avec l'anonymisation évitant l'autocensure généralisée et donc la dégradation de la qualité des informations échangées. Il s'agit donc bien là d'une caractéristique locale ayant un impact global. Les limites de cette approche résident dans le fait qu'elle concerne des situations de communication synchrone, c'est-à-dire avec des interlocuteurs disponibles au moment de l'interaction, ce qui ne correspond pas forcément à la réalité d'une entreprise. Si les outils peuvent être disponibles en permanence, il n'en va pas de même pour les humains, qui peuvent être occupés à une autre tâche à un instant t , voire absents durant des semaines. De plus, même en cas de disponibilité, le collaborateur peut être éloigné géographiquement et communiquer à distance. Au-delà de la qualité de l'information de communication, cette partie présente l'importance de la confiance, de la fréquence, et de la métacognition que cette information doit porter ainsi que de la stigmergie permettant sa circulation entre les individus.

2.4.4.1 *Confiance*

Comme vu dans la Section 2.4.2 avec la prise de décision partagée, le fait de mettre à disposition toutes les informations nécessaires contribue à augmenter la confiance en éclairant la décision, en l'occurrence celle du patient. À ce propos, il a plus tard été démontré, lors de situation de collaboration entre un humain et un robot, que la quantité de détails informationnels délivrée par le robot à l'opérateur humain influait sur la confiance de ce dernier. Plus précisément, lorsque le niveau de confiance de l'humain est bas, un plus haut niveau de transparence du robot a tendance à accroître sa confiance. En revanche, cela a tendance à baisser son niveau de confiance si son niveau était déjà haut (Akash et al., 2019). À nouveau, le fait de pouvoir moduler les caractéristiques, en l'occurrence le niveau de détail, des échanges entre les différents agents d'une collaboration peut donc être bénéfique.

Dans un espace numérique, les Communautés de Pratique (CoP) sont confrontées à une problématique supplémentaire de confiance concernant la légitimité des participants et de leurs contributions (Rauffet, 2009). Le manque d'interactions en face à face rend l'évaluation de la fiabilité et de l'expertise des autres membres plus difficile. Pour contrer cela, une réification automatisée est nécessaire, c'est-à-dire une transformation de connaissances tacites en connaissances explicites, en l'occurrence la connaissance à réifier est la confiance elle-même. Autrement dit, le concept abstrait de confiance doit être concrétisé en objet à la manière de notes attribuées par exemple. De plus, les utilisateurs légitimes doivent pouvoir interagir avec le contenu automatisé pour le contrôler, rectifier ou enrichir. Ainsi leur fiabilité est renforcée et donc la confiance des utilisateurs dans les informations du système.

Selon les travaux de (Lewicki & Bunker, 2012), la confiance est un processus évolutif qui peut se créer, se renforcer, se perdre ou se réparer, et qui comporte trois étapes :

- La confiance basée sur le calcul : pragmatique et conditionnelle, elle est motivée par des intérêts personnels et la dissuasion par crainte de conséquences négatives, comme dans le cadre d'un contrat ;
- La confiance basée sur la connaissance : repose sur la compréhension des actions et motivations de l'autre partie grâce à la prévisibilité de son comportement ;
- La confiance basée sur l'identification : repose sur une connexion émotionnelle profonde et un partage des valeurs dans lesquels il y a une pleine compréhension et identification aux intentions de l'autre.

Les trois étapes évoquées précédemment sont des niveaux de profondeur de la confiance, du niveau le plus fragile au niveau le plus fort. Leurs préconisations vont dans le sens d'un environnement encourageant le dialogue ouvert et la vulnérabilité pour approfondir les niveaux de confiance. Une mise en garde est faite contre une dépendance excessive aux contrats formels et mécanismes de dissuasion en général du premier niveau pour favoriser cet approfondissement du niveau de confiance. Cela va dans le sens d'une communication plus continue et régulière. La partie suivante apporte de précision vis-à-vis de la régularité de la communication.

2.4.4.2 Fréquence de communication

D'une part l'explicitation des connaissances tacites est montré comme étant cruciale par (Rauffet, 2009), et d'autre part la communication claire des intentions et des actions est montrée comme nécessaire par (Lewicki & Bunker, 2012) dans la construction d'une confiance basée sur la connaissance. Ils s'accordent donc sur la nécessité d'une transparence dans la communication. Ils s'accordent également à souligner l'importance d'une communication fréquente. Pour le premier, les interactions régulières permettent de maintenir la légitimité des participants pour un meilleur partage des connaissances, en particulier en l'absence de contact en face à face. Pour les derniers, plus les interactions sont fréquentes, plus la confiance est renforcée au fil du temps grâce au cumul de témoignages de comportements fiables.

La nécessité d'une régularité dans les interactions est mise en avant. Mais dans un contexte d'entreprise, la question d'un conflit entre une fréquence d'interactions trop élevée et les contraintes de temps rationnés, de dates limites et d'exigences de réactivité des experts peut être soulevée. La régularité semble cruciale, mais un examen plus approfondi de la question de la fréquence est nécessaire. Les travaux de (Patrashkova-Volzdoska et al., 2003) montre une relation curvilinéaire (concave), comme représenté sur la Figure 2.3, entre la fréquence des communications au sein d'une équipe de projet interfonctionnelle et ses performances. La fréquence optimale diffère selon le moyen de communication et la tâche à accomplir. En effet une fréquence de communication trop basse ou trop haute impacte négativement la performance de l'équipe. Un juste milieu est donc nécessaire pour améliorer cette performance. Plus précisément, trois types de communication ont été étudiés : face-à-face,

courriel et téléphone. Le face-à-face comme les courriels ont cette relation en U inversé entre la quantité et la performance. Une insuffisance quantitative peut mener à un manque d'information nécessaire pour mener la tâche au mieux, mais un excès peut provoquer des malentendus et conflits pour le face-à-face et à une surcharge d'informations et des retards pour les courriels. Le téléphone n'a pas donné de résultat. Une utilisation modérée de l'un comme de l'autre est souhaitable, avec une augmentation des courriels en fonction de la dispersion géographique des membres, sans tomber dans l'excès toutefois. Le téléphone n'a pas donné de résultat significatif sur la performance, ce qui pourrait signifier une utilité moindre du téléphone pour la communication d'équipe dans ces projets interfonctionnels.

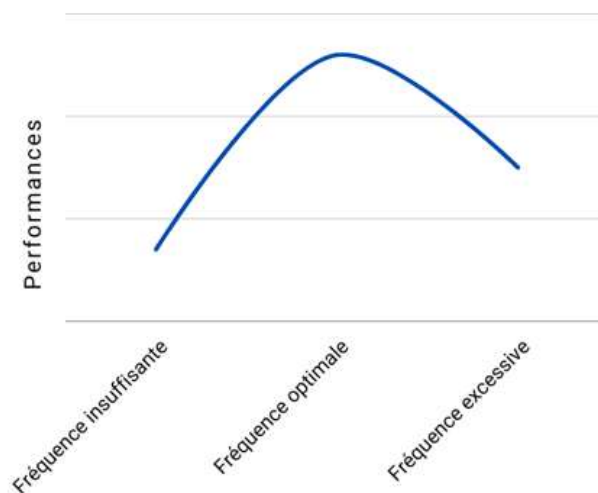


Figure 2.3 : Relation curviligne entre fréquence de communication et performance, adapté de (Patrashkova-Volzdoska et al., 2003)

2.4.4.3 Métacognition supra-personnelle

La partie traitant de la psychologie de groupe (Section 2.4.3.2) a montré qu'une auto-évaluation rendue possible était importante lors d'un travail de groupe, et ce car le simple fait d'avoir un retour sur sa propre contribution aide à maintenir la motivation nécessaire. Mais une évaluation des autres sur un sujet peut aussi aider à le traiter. En particulier dans un contexte d'activité complexe, lorsqu'un expert avec plus d'expérience peut contribuer à la conscience de situation ou, que la question à traiter met en jeu plusieurs expertises.

En gestion des connaissances, il est connu que plus un acteur est expert dans un domaine et plus il est difficile d'éliciter sa connaissance, c'est-à-dire de rendre sa connaissance tacite la plus explicite possible (Aries et al., 2008). Les niveaux d'expertise peuvent être synthétisés en quatre stades :

- L'acteur n'est pas compétent et n'en est pas conscient (car il n'en sait pas assez pour se rendre compte de l'étendue de ce qu'il ne sait ou ne maîtrise pas) ;
- L'acteur est incompetent et le sait ;
- L'acteur est compétent et en a conscience ;
- L'acteur est compétent et n'a pas conscience de son expertise (car il est tellement compétent que cela lui semble désormais naturel et évident).

L'inversement proportionnel entre l'évolution des expertises et la facilité de leur transmission rend difficile le travail d'élicitation d'un ingénieur en gestion des connaissances. Or, la clarification des savoirs et des systèmes de pensées permet leur communication à des tierces personnes.

Lorsqu'un expert évalue une situation relevant de son propre domaine, cette évaluation peut rester tacite et interne : son système 1, tel que représenté dans la Figure 2.4 inspirée de (Shea et al., 2014), nourri par l'expérience, suffit alors pour guider l'action sans nécessiter de mise en mots explicite.

En revanche, lorsqu'il s'agit de partager cette évaluation avec d'autres experts, une formalisation est indispensable : les représentations doivent être rendues explicites et communicables. C'est le rôle du système 2, qui élabore et échange des représentations métacognitives.

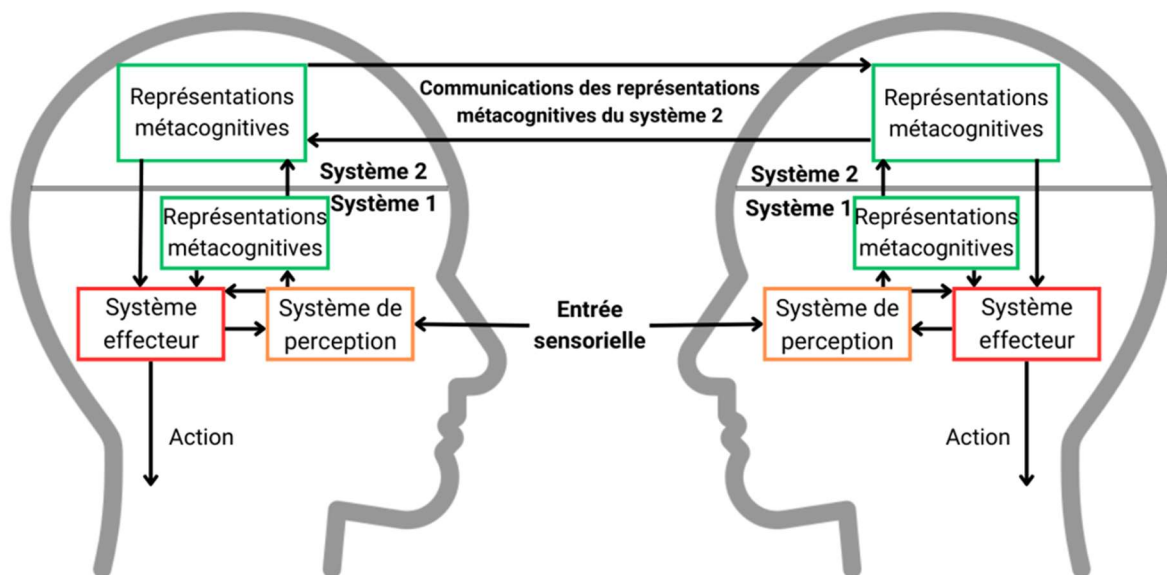


Figure 2.4 : Métacognition et control cognitif supra-personnel adapté de (Shea et al., 2014)

Le système 1 inclut des représentations métacognitives, qui sont des réflexions sur le processus de pensée lui-même. Par exemple, une personne pourrait avoir une pensée accompagnée d'une auto-évaluation, de type : « Je pense cela, mais je doute de la validité de mon jugement ». Ces représentations permettent de surveiller et de réguler sa propre cognition, même si elles se déroulent souvent de manière rapide et inconsciente.

Le système 2 correspond à des représentations métacognitives dérivées des informations du système 1 mais mises sous une forme qui peut être verbalisée. Il est au centre de la prise de décision collaborative et peut permettre à tout un chacun de pondérer l'apport de chaque participant en fonction de la confiance qu'il accorde à ses propres représentations cognitives, comme c'est le cas lors de l'écoute des témoins lors d'un procès. Enfin, il permet de construire de nouvelles représentations métacognitives en inférant et en combinant plusieurs représentations métacognitives. Ce dernier rôle est valable au sein d'un même individu en se

basant sur les différentes représentations internes, mais aussi en groupe en utilisant les représentations communiquées par les autres individus, ce qui lui confère, une fois de plus, un rôle central dans la cognition de groupe. Pour résumer, le système 2 permet trois choses concernant les représentations métacognitives :

- Les communiquer en les rendant verbalisables ;
- Les pondérer en évaluant la confiance ;
- Les utiliser pour en construire de nouvelles.

Ainsi, un système guidant les experts à travers un processus suivant les principes de métacognition de système 2 serait bénéfique. L'explicitation et la communication des représentations métacognitives au sujets des problèmes rencontrés au sein de l'organisation permettrait d'élever la résolution de problème du niveau individuel au niveau collectif.

Métaphore 2.4

Un système intégrant de l'information métacognitive supra personnelle dans l'organisation apporterait les conditions nécessaires pour l'augmenter et la rendre notamment apprenante. En effet, la métacognition au sein d'un individu lui apporte une réflexivité nécessaire à son apprentissage et amélioration continue selon (Schön, 2017) qui insiste sur le fait que cet apprentissage se fait dans l'action, en remettant en cause la dichotomie traditionnelle entre la théorie et la pratique.

Cette élévation au niveau collectif soulève la question du choix des participants à cette collaboration. La sollicitation de parties prenantes dans une collaboration pour une prise de décision, qu'elles soient humaines ou machines, ne doit pas se faire de manière hasardeuse (Parnell & Gangwish, 2023) :

- D'une part, parce que l'activité de certaines parties prenantes sort du cadre du problème en question et ne serait d'aucun secours tout en complexifiant la collaboration à cause du nombre de participant (Hu et al., 2024) ;
- D'autre part, comme vu dans la partie sur le connexionnisme, parce que la sollicitation systématique de la totalité des éléments constituant de l'organisation accaparerait la capacité de toute l'organisation et affecterait donc sa capacité à gérer de multiples tâches en parallèle. Ce n'est de toute évidence pas adapté à la taille et la complexité de l'activité d'une grande organisation. Il apparaît une nouvelle fois qu'une organisation de l'activité en réseau de groupes, ou SMA, semble plus adaptée (Huang et al., 2023).

Ce choix peut ne pas être évident dans une organisation complexe et de grande taille, d'autant plus si l'auteur de ce choix manque d'expérience et donc de conscience de situation. Il est ici question de méconnaissance non pas du problème à résoudre lui-même, mais de la constitution de l'organisation quant aux experts ou outils, et leurs différents rôles, compétences ou capacités.

Un modèle ou un outil permettant d'intégrer cet aspect et d'aider dans ce choix serait donc bénéfique. Cela nécessite des principes et des modèles concernant des manières possibles de communiquer en groupe et d'émettre des sollicitations judicieuses envers les autres agents pour former avec eux un SMA pertinent dans une situation donnée. Comme dans tous les

domaines de compétences, les débuts peuvent ne pas être optimaux mais s'améliorer sur la base de leur analyse au fil du temps pour aboutir par la suite à de meilleurs choix.

Ainsi, un processus d'apprentissage multi-agents est nécessaire, par un processus d'intégration de l'information issue de ces expériences (de Zarzà et al., 2023). Il s'agit non seulement d'un apprentissage concernant la solution à apporter au type de problème en question, mais également concernant les agents à solliciter pour résoudre ce type de problème. La partie suivante présente des pistes issues de la littérature pour cet apprentissage multi-agents, ou organisationnel.

2.4.4.4 La stigmergie : un apprentissage multi-agents

En groupe, un comportement local et individuel même simple et systématique peut voir, au niveau global et collectif, l'émergence d'une organisation sophistiquée par son efficacité et sa résilience (Camazine et al., 2020). La relative autonomie de chaque individu du groupe rend cette organisation robuste dans le sens où elle est modulaire (Page, 2010). Si des individus sont soustraits ou ajoutés au groupe, son fonctionnement global n'est pas impacté. De même au niveau local, si un individu est soumis à un événement imprévu, il conserve toute la liberté nécessaire pour déroger aux règles afin de mieux l'appréhender (Couzin et al., 2005). Concrètement, dans l'exemple des oiseaux de la



Figure 2.5 : Organisation émergente. Ici chaque oiseau profite du sillage de celui qui le devance pour économiser de l'énergie en se positionnant dessus, comme un surfeur sur une vague, ce qui crée cette forme de « V » de loin. Il se relayeront pour remplacer la place du premier, plus fatigué.

Figure 2.5, le groupe dans son ensemble pourra parcourir une distance plus longue grâce à la disposition des individus les uns par rapport aux autres. En effet, cette disposition permet une économie d'énergie, l'oiseau suiveur profitant des flux d'airs ascendant émis par le meneur (Weimerskirch et al., 2001). Toutefois si l'un d'entre eux est sur le point d'entrer en collision avec un obstacle par exemple, il est libre de quitter la formation en V pour sa survie.

L'apparition d'applications de systèmes multi-agents dans le milieu de l'informatique s'est inspirée en autres de ces comportements que l'on trouve dans la nature, principalement pour faire des simulations et étudier les comportements émergents de systèmes multi-agents sous différents paramétrages des agents (Bonabeau, 1999). Au sein de ces auto-organisations, parmi les règles locales et comportementales simples qui aboutissent à une organisation globale sophistiquée, peuvent se trouver des communications entre les individus. Il est intéressant de noter en particulier les communications indirectes et asynchrones utilisant le milieu dans lequel le groupe évolue comme support (Grassé, 1959). Cette communication indirecte est observée chez des insectes comme les fourmis. L'exemple classique des fourmis est intéressant : chaque fourmi dépose des phéromones qui attirent les autres fourmis sur le sol (Deneubourg et al., 1990). Les autres fourmis sont donc attirées par les voies contenant la plus grande quantité de phéromones, c'est-à-dire ayant vu passer le plus grand nombre de leurs semblables. Ceci a pour effet de guider l'ensemble des fourmis vers les ressources

trouvées, ou vers la fourmilière selon les besoins, en empruntant le chemin le plus court comme le met en évidence la Figure 2.6.

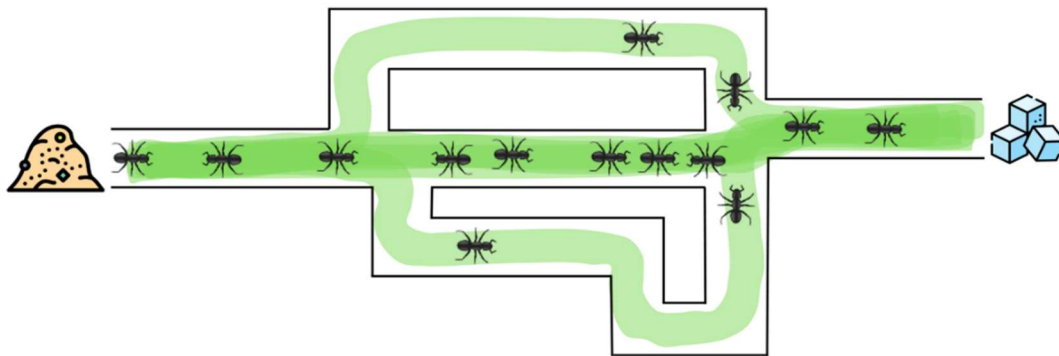


Figure 2.6 : Stigmergie indiquant aux fourmis le chemin le plus court entre une source de nourriture et la fourmilière

Ce type de communication par le biais d'une modification de l'environnement se nomme la stigmergie, terme introduit en 1959 lors de l'étude des termites dans la construction de leurs nids (Grassé, 1959). Dans l'exemple des fourmis, le médium servant de support aux indicateurs, en l'occurrence des phéromones, est le sol sur lequel elles évoluent. Il peut donc être physique, mais également numérique comme ce fut le cas lors d'une expérience montrant que la stigmergie fonctionne dans un groupe humain (Bassanetti et al., 2023). Des groupes de cinq personnes ont été soumis à des conditions dans lesquelles elles étaient physiquement séparées et ne pouvaient pas communiquer directement mais dont l'objectif était, comme les fourmis, de trouver des éléments mais dans un espace numérique sous forme de grille dont il faut trouver les cases contenant les plus grands nombres. Ces participants pouvaient interagir avec ce monde numérique via des interfaces sur écran d'ordinateur en mettant une note sur les cases explorées, ensuite visible par les autres. Cela a induit de meilleurs résultats des participants en général, à condition qu'ils ne soient pas en compétition les uns avec les autres.

Le système stigmergique, utilisé par les insectes, fonctionne donc également chez les humains et le support physique peut également être numérique.

Si la stigmergie fonctionne dans un petit groupe d'humains, elle est aussi applicable à grande échelle comme le montrent le fonctionnement de l'encyclopédie libre et collaborative Wikipédia ainsi que du monde du logiciel libre (Elliott, 2006). Concernant l'exemple de Wikipédia, il s'agit d'une encyclopédie collaborative en ligne. Cette dernière comporte les caractères de la stigmergie comme la collaboration asynchrone, l'absence de coordination centralisée ou le fait que la contribution de chaque utilisateur est guidée par les modifications laissées par les utilisateurs précédents.

Métaphore 2.5

Entre les neurones d'un cerveau, en complément des connexions physiques établies par les synapses, l'activité d'une synapse peut engendrer la propagation d'ondes de calcium (Cornell-Bell et al., 1990). Ces ondes ne se propagent pas directement dans le réseau de neurones eux-mêmes, mais dans le réseau des astrocytes (cellules gliales, c'est-à-dire des cellules qui constituent l'environnement des neurones) qui interagit avec les neurones. Cela ajoute une dimension supplémentaire à la coordination dans l'association et la coordination des neurones. Si une zone fonctionnelle du réseau de neurones nécessite la sollicitation d'autres zones dans certains contextes, cette dimension peut jouer ce rôle. Cette dimension fonctionnelle apporte une notion de distance fonctionnelle entre les neurones, qui est différente de la distance physique. Ainsi, deux synapses proches en termes de propagation d'ondes de calcium peuvent être physiquement éloignées. Cette matrice cellulaire dynamique enrichit la régulation du réseau en augmentant la complexité.

Basé sur ce mécanisme, les auteurs de (Xu et al., 2019) ont proposé un modèle d'apprentissage par stigmergie dans le domaine de l'informatique. Ce modèle a été appliqué à des problèmes de coordination et d'affectation de tâches dans des simulations. La régulation basée sur les distances entre agents a amélioré significativement les performances du système. Cela montre que les principes de stigmergie permettent de mieux comprendre les mécanismes cérébraux complexes et concevoir des systèmes d'apprentissage et de coordination efficaces en intelligence artificielle. En considérant l'organisation comme étant un SMA, ce modèle de distance fonctionnelle peut être adapté à cette étude comme présenté dans la Figure 2.7. Ici, les neurones sont remplacés par les agents nécessitant de collaborer. La notions de distance associée à une influence dans un médium donné peut permettre de faire émerger des réseaux de collaborations fonctionnelles particulières.

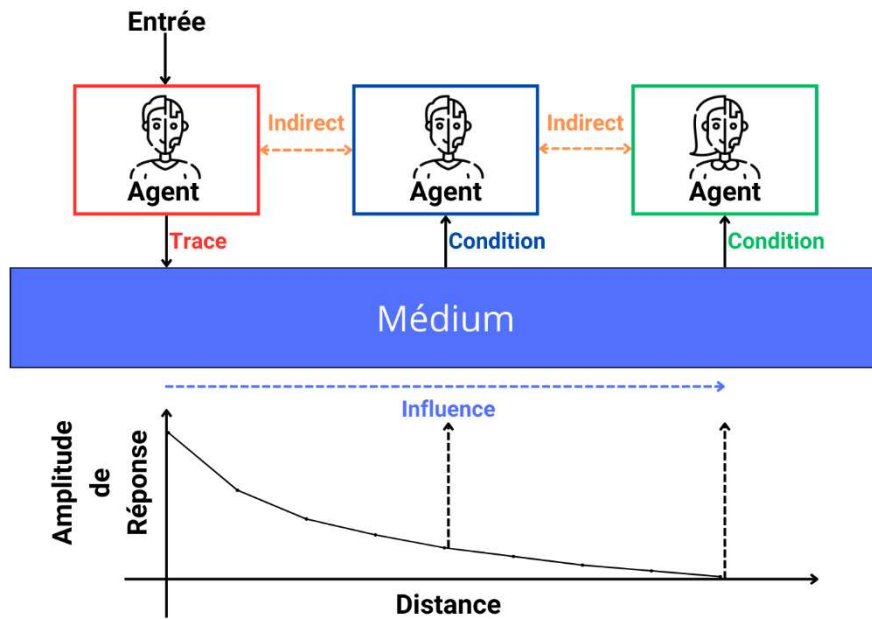


Figure 2.7 : Apprentissage stigmergique et distance d'influence adapté de (Xu et al., 2019)

Métaphore 2.6

Comme décrit précédemment, pour la résolution d'un problème au sein d'une organisation, la recherche du bon expert en la matière peut poser un défi. Cet écueil peut être réduit à l'aide de ce concept de distance entre agents qui fait varier l'influence que ces agents exercent les uns sur les autres de manière plus ou moins importante. Dans cet exemple du cerveau, la notion de distance est basée sur une quantité chimique dans un espace matériel, mais peut être simulée numériquement.

Dans ce sens, l'esprit étendu est évoqué pour désigner le fait que, sans concevoir une nouvelle technologie, la cognition, ou ce qui est parfois appelé plus largement esprit quand on y inclut des concepts comme les émotions ou les croyances, ne se limite pas à des processus circonscrits à l'intérieur de la tête de l'individu (Clark & Chalmers, 1998). Dans l'exemple d'une personne qui aurait rendez-vous au restaurant X et croirait qu'il se situe dans la rue Y, cette croyance est la même, que le souvenir de l'information « rue Y » ait été récupéré directement dans la mémoire de son cerveau ou sur un bloc-notes. La différence de support et de rapidité d'accès ne saurait justifier une différence de considération du processus.

La notion de médium autre qu'interne à l'individu dans les processus cognitifs n'est donc pas nouvelle et l'intervention d'un milieu intermédiaire externe dans la prise de décision est tout à fait envisageable. La partie suivante présente un type de médium intéressant dans le contexte d'une activité industrielle complexe et de manière plus générale une grande organisation.

2.5 Synthèse : vers un système multi-agents pour l'aide à la décision collective

De cette bibliographie plusieurs idées émergent, permettant d'identifier des besoins afin de favoriser une meilleure collaboration pour la prise de décision, dans le contexte industriel considéré.

L'approche cognitiviste permet d'appréhender et de résoudre des problèmes de haut niveau, mais elle a l'inconvénient de donner des référentiels et des systèmes rigides. En effet, des applications suivant cette approche, comme la gestion des connaissances (Nonaka & Takeuchi, 1995) ou le langage Prolog (Bratko, 2001), sont vulnérables à une altération et manquent de flexibilité pour répondre de manière adaptée à une situation réelle (Winograd, 1986). Elles s'apparentent à un programme informatique classique qui, en fonction des données en entrée et à partir de règles qu'on lui a fourni, doit donner un résultat adapté. Des données imprévues ou une règle manquante le mettent en échec.

L'approche connexionniste permet d'effectuer une grande quantité de tâches cognitives comme la reconnaissance d'images (Krizhevsky et al., 2012), de textes en langage naturel (Devlin, 2018) ou de tendances (Hochreiter, 1997) de manière robuste. Elle a l'inconvénient de répondre à des tâches spécialisées. En effet, les applications comme l'apprentissage profond peuvent exploiter un grand nombre de données, et parfois de résultats associés préalablement, pour donner des règles adaptées. Mais une tâche cognitive qui s'éloigne un peu de celle pour laquelle le programme a été conçu et dimensionné le mettra en échec (Marcus, 2018).

Pour cela, Minsky a introduit une approche concernant la cognition, basée sur le principe de la « société de l'esprit » (Minsky, 1986). Elle correspond à une hybridation du cognitivisme et du connexionnisme et possède les avantages des deux. Plus adaptable aux imprévus, résiliente, cette approche permet d'appréhender un contexte industriel complexe mettant en œuvre l'activité de nombreux acteurs, humains ou machines (Clancey, 1997). Cette structure en société sert dans ces travaux de fondation pour penser un environnement numérique assez flexible pour être incarné par cette variété d'acteurs. Une conscience de situation jusque-là inaccessible aux parties isolées serait fournie grâce à cet espace numérique qui a pour vocation de tendre vers une omniscience. Cette conscience de situation à visée nettement plus holistique donnerait lieu à des décisions individuelles plus éclairées concernant leur impact au niveau organisationnel. Pour cela, la structure modulaire en société peut se traduire par un SMA. Ce SMA est un support nécessaire à la stigmergie comme processus de transmission de l'information de l'agent au système. Ainsi, chaque agent peut accéder à une information, et donc une conscience de situation, plus holistique.

Tous ces principes et concepts doivent être réunis en un cadre de modélisation proposant un modèle d'agent et un modèle de système multi-agent, permettant l'analyse du terrain d'étude à travers ce cadre de modélisation. Ce cadre de modélisation vise à répondre aux besoins « d'augmentation » de l'organisation pour la rendre apprenante via un système d'aide à la décision collaborative. La constitution de ce cadre de modélisation est l'objet du chapitre suivant. L'implémentation de ce cadre de modélisation sous la forme d'un environnement numérique collaboratif, véritable système d'aide à la décision, interviendra dans le chapitre 4.

Chapitre 3 Proposition d'un cadre de modélisation pour la prise de décision collective

Ce chapitre vise à présenter un cadre de modélisation qui repose sur les problématiques et notions soulevées précédemment lors de l'étude de la bibliographie. Ce cadre de modélisation a pour objectifs de supporter la collaboration pour les prises de décision collectives, ainsi que l'apprentissage d'ordre organisationnel, c'est-à-dire également en se plaçant à un niveau collectif. Ces objectifs visant à favoriser l'organisation apprenante, la partie suivante est introduite par la définition du cadre dans lequel ce modèle s'inscrit et ce qui est entendu par organisation apprenante en la représentant conceptuellement. Pour ce faire, des notions existantes sont combinées et complétées. Puis sont définis ses différents composants et les fonctionnalités de la matrice liant ces composants. Cette matrice, ou environnement, appuie ces composants dans leurs activités décisionnelles.

3.1 Les SMA comme support des organisations apprenantes

La section 2.1 a montré en quoi l'organisation, qui est un système complexe, pouvait être pensée comme un cerveau et communiquée à travers un vocabulaire appartenant au domaine cérébral. En effet, cela facilite la réflexion, de la compréhension à la conception, et la communication sur le sujet. Ceci est nécessaire pour clarifier l'approche globale de ces recherches, mais est général et théorique. La partie suivante aborde donc les mécanismes nécessaires et concrets que cela implique. L'objectif étant d'obtenir une organisation apprenante et comportant des processus collaboratifs améliorant les décisions, cette partie montre en quoi cela implique une flexibilité dans les processus et la structure de l'organisation en elle-même, ce qui peut se traduire par le SMA.

3.1.1 Les SMA : définitions

Les sections 2.2 et 2.3 ont montré respectivement comment l'approche cognitive et l'approche connexionniste devaient être hybridées, et comment cela se traduisait par le choix des SMA. Cette partie détaille ce qu'est un SMA précisément.

Un système multi-agents (SMA) est un ensemble structuré composé d'un environnement, d'objets, d'agents, de relations entre ces éléments et d'opérations permettant aux agents d'interagir avec leur environnement (Aung et al., 2010; Ferber, 1997; Oliveira, Gomes, et al., 2013; Oliveira, Pinto, et al., 2013). Les agents peuvent percevoir, transformer ou manipuler les objets présents dans l'environnement, et établir des relations avec d'autres agents. Cette organisation repose sur une dualité fondamentale entre l'agent et son environnement : l'agent agit en fonction de ce qu'il perçoit et reçoit comme informations, tandis que l'environnement est défini comme tout ce qui n'est pas l'agent. La conception d'un SMA implique donc une définition conjointe de la structure des agents et de celle de leur environnement.

Un agent, dans ce contexte, est une entité physique ou virtuelle capable d'agir, de percevoir partiellement son environnement, de communiquer avec d'autres agents et de poursuivre des

objectifs propres (Ferber, 1997; Khamphanchai et al., 2012). Il dispose de ressources et de compétences, et son comportement est guidé par des tendances internes, comme la satisfaction ou la survie. L'autonomie est une caractéristique essentielle : l'agent décide lui-même de ses actions en fonction de ses perceptions, de ses représentations et des informations reçues. Il peut aussi gérer ses ressources, ce qui lui confère une certaine indépendance vis-à-vis de son environnement. Cette approche permet de modéliser des systèmes complexes où les agents coopèrent ou interagissent pour atteindre des objectifs communs ou individuels

Cette approche correspond parfaitement à l'approche systémique nécessaire pour appréhender la complexité et le caractère multi-niveaux d'une organisation, comme expliqué dans la partie suivante.

3.1.2 L'organisation : un système de systèmes

Concernant les organisations, les théories de la contingence montrent que la structure des organisations doit s'adapter aux conditions. Il n'existe pas une vérité fixe et précise quant à la structure à adapter pour les organisations en général. Pour rendre les organisations apprenantes, une approche systémique est nécessaire. Une organisation est un système de systèmes (Boy, 2019). Cette vision correspond aux systèmes multi-agents. Les sous-systèmes, ou agents, sont de différents niveaux. Lorsque l'on adopte une approche systémique, il existe différents niveaux de problèmes dans l'organisation comme le niveau personnel, groupal, organisationnel ou institutionnel.

La grille d'Ardoino (Ardoino, 1978), issue du domaine de la pédagogie, correspond à une telle approche systémique qui considère les différentes échelles imbriquées de l'organisation : individuelle, interindividuelle, groupale, organisationnelle et institutionnelle. D'autres modèles issus de la théorie des organisations existent, comme les niveaux d'analyse présentés dans (Hatchuel & Weil, 1992) qui distingue trois niveaux : l'individuel, l'organisationnel et l'environnemental. Mais il est davantage tourné vers le milieu externe et serait plus pertinent pour étudier les interactions entre l'entreprise et ses fournisseurs, clients ou réglementations. Même si la maintenance aéronautique implique généralement une collaboration étroite avec le client, cette étude se limite volontairement à un cadre interne, pour des raisons de faisabilité expérimentale. Le modèle d'organisation apprenante de Senge (Senge, 1990) présente des disciplines intéressantes qui conditionnent l'apprentissage organisationnel, comme la vision partagée, l'apprentissage en équipe, la maîtrise personnelle, la pensée systémique et les modèles mentaux. Toutefois il n'offre pas un cadre permettant de souligner les conflits entre les différentes logiques internes dus à des visions parfois opposées comme la productivité, la sécurité ou l'innovation. Le modèle systémique de Le Moigne (Le Moigne, 1994) représente également l'organisation comme un système complexe en interaction avec son environnement et insiste sur l'aspect intéressant des boucles de rétroaction. Mais à nouveau, ce modèle est plus orienté sur une modélisation générale, qui n'est pas spécialement anthropocentrée et plutôt tourné vers l'extérieur, contrairement à Ardoino qui prend en compte les dimensions psychosociologiques de conflits internes. Plus ancien encore, le modèle sociotechnique (Trist & Bamforth, 1951) met l'accent sur l'interaction entre les facteurs techniques et sociaux qui a un impact indéniable. Mais cela ne suffit pas pour

l'approche de ces travaux appréhendant la complexité avec davantage de détails quant aux multiples niveaux d'influence en jeu. Les modèles cités ici, bien qu'adoptant une approche systémique complexe, ne sont pas aussi adaptés que la grille d'Ardoino pour décrire l'aspect pluridimensionnel des organisations. En effet, elle prend en compte les différents niveaux de granularité dont les enjeux s'entrecroisent.

Le niveau individuel, lorsque l'observation s'y place, tend à expliquer un problème par la personnalité ou le comportement d'un individu et sa psychologie en qualifiant l'individu d'individualiste/altruiste ou d'incompétent/compétent par exemple (Decety, 2020). Ainsi, l'expérience, la compétence et la prise de décision des participants influencent directement la qualité de la maintenance (Sheikhalishahi et al., 2016).

Le niveau interindividuel tend à donner des explications centrées sur la relation entre deux individus et des solutions au niveau relationnel. Comme l'objet est la relation elle-même et son histoire, l'analyse qui en ressort est sa nature et ses caractéristiques comme la complicité ou le conflit, et la perturbation de la communication. Ce niveau se place plutôt dans le champ de la psychologie sociale (Agnoletti, 2016). Ainsi, l'application de cette notion à la maintenance démontre que la communication entre les participants est essentielle (Patriarca et al., 2018).

Le niveau groupal situe le groupe au cœur du processus observé. Ce niveau transpose les techniques relationnelles du niveau interindividuel, mais se place dans un paradigme de système complexe (Fauchoux, 1957). Autrement dit, l'ensemble du groupe présente des caractéristiques qui émergent, en plus de la simple addition des membres, de leurs relations bilatérales et de leurs caractéristiques (Mack, 1997; Morin, 2013). Les analyses sont orientées vers des notions systémiques comme les retours et les médiations et se placent entre les champs de la psychologie et de la sociologie. On peut parler de psychosociologie (Herreros, 2012). L'application de cette notion aux équipes de maintenance s'illustre dans le travail en coordination, avec des routines favorisant idéalement des interactions fréquentes et une culture spécifique (Gittell, 2002).

Le niveau organisationnel situe l'analyse au niveau macro de la structure et des règles de l'organisation. Par exemple, dans une entreprise, la structure concerne la présence de départements, de services et la répartition géographique du personnel, tandis que les règles peuvent concerner les processus ou les horaires (Friedberg, 1977; Mintzberg, 1993). Ce niveau est particulièrement concerné par les enjeux de changements et de stratégies (Burns & Stalker, 1961) et se place dans le champ de la sociologie des organisations (Scott & Davis, 2015). Par exemple, la stratégie de maintenance est une décision organisationnelle influencée par les objectifs de performance et de rentabilité (Tsang, 2002).

Le niveau institutionnel englobe un cadre plus large contenant l'organisation parmi d'autres acteurs institutionnels. Il s'agit, dans le cas d'une entreprise, de la société dans laquelle elle évolue, avec ses valeurs et sa culture (DiMaggio & Powell, 1983; North, 1990). L'organisation n'est pas uniquement soumise à ses propres règles, mais également à celles imposées par son environnement institutionnel, notamment les normes et lois (Meyer & Rowan, 1977). De plus, des dynamiques sociales plus profondes, comme la stratification sociale et les rapports de pouvoir, influencent la hiérarchie organisationnelle (Bourdieu, 1984). Ce niveau relève de la macrosociologie (Scott, 2008). Les réglementations, normes de sécurité et certifications

structurent les pratiques (Dekker, 1996). Par exemple, la norme ISO 55000 fournit un cadre de référence transversal pour la gestion d'actifs dans les organisations, influençant les stratégies et la structuration des responsabilités à un niveau global (ISO, 2014). Dans les secteurs hautement régulés comme l'aéronautique, la norme EN 9100, dérivée de l'ISO 9001, définit des exigences strictes en matière de qualité et de traçabilité, influençant l'organisation interne et les responsabilités (AS9132, 2002).

Un niveau de granularité encore plus élevé est parfois ajouté : celui de l'historicité (Touraine, 2018). Il ne s'agit pas simplement d'observer la société au niveau institutionnel, mais d'analyser sa transformation dans le temps et ses effets sur les structures économiques et sociales (Braudel, 2018; Giddens, 1984). Cette approche met en évidence les évolutions des organisations vis-à-vis des dynamiques historiques et sociales (Elias et al., 1991).

La raison d'être de cette recherche expérimentale est de rendre l'organisation apprenante, ou du moins d'améliorer son aspect apprenant. Le problème se situe donc, par définition, à un niveau organisationnel. Par conséquent, selon la grille d'Ardoino qui respecte une approche systémique, les solutions doivent se placer au niveau organisationnel. Cependant, ces niveaux de considération sont imbriqués les uns dans les autres. Il ne s'agit donc pas de prendre uniquement ce niveau en considération mais également les autres auxquels il est lié. L'étude d'un problème donné, si elle doit mettre l'accent sur le niveau sur lequel ce problème se place, doit donc idéalement présenter une prise en compte multi-niveaux. La flèche rouge de la *Figure 3.1* représente cette prise en compte multi-niveaux car, bien que le problème considéré se trouve au niveau organisationnel, le niveau institutionnel l'encadre et les niveaux inférieurs (groupal, interindividuel, individuel) le composent. Ici, le niveau organisationnel, correspondant au niveau sur lequel l'étude se concentre, est mis en évidence en couleur orange, même si tous les autres niveaux sont concernés et liés également à tout problème appartenant à ce niveau. La flèche rouge représente cette transversalité d'un problème considéré par-delà les différents niveaux.

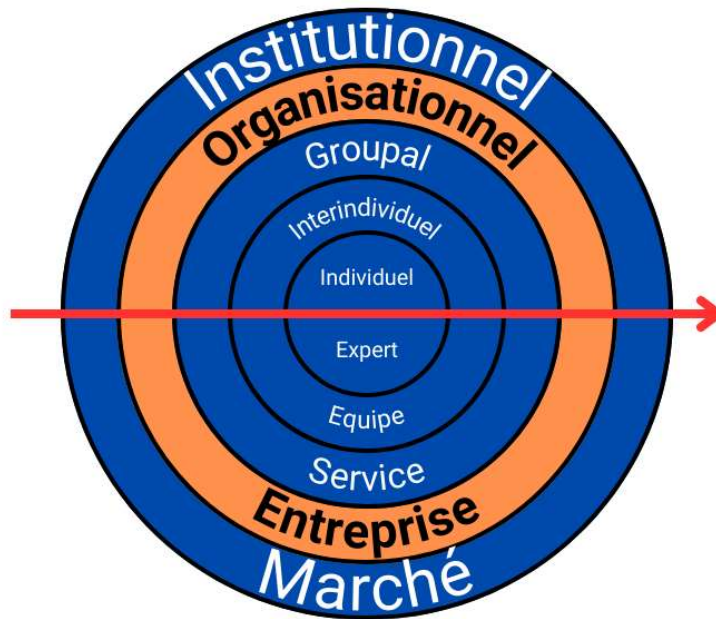


Figure 3.1 : Schématisation de la grille d'Ardoino, 1978) avec mise en regard pour chaque niveau de son pendant en milieu d'entreprise.

Un cas générique d'évènement lié à la maintenance d'un moteur d'hélicoptère est donc concerné par tous ces niveaux à la fois. Les approches pour améliorer une activité de maintenance doivent donc, plus ou moins, tous les prendre en considération à la fois, même si un accent peut être mis sur un ou plusieurs niveaux. Le modèle nécessite donc de présenter une flexibilité permettant d'appréhender cette complexité multi-niveau. La décomposition d'un cas de maintenance type et l'analyse de ses différentes phases permet de bien prendre conscience de cet enchevêtrement de différents niveaux. C'est l'objet de la partie suivante.

3.1.3 L'apprentissage

Une fois le besoin de flexibilité pris en compte pour permettre à l'organisation de constituer sa structure et ses processus autour de ses moyens et de ses fins, il est nécessaire d'étudier les mécanismes en jeu dans l'apprentissage, pour les y intégrer. C'est ce que propose cette partie, en expliquant l'importance des boucles de rétroaction, puis sous quelle forme et où se situent ces processus. Cette partie montre l'importance de comprendre que la situation du processus d'apprentissage ne se limite pas à la tête de l'individu, et l'importance des interactions entre les individus.

3.1.3.1 La boucle de rétroaction

Le concept de boucle fermée de rétroaction est au cœur de la notion d'apprentissage. Il est présent en ce qui concerne les actions les plus simples et courantes comme un mouvement. C'est l'apprentissage moteur (Adams, 1971) qui permet, au cours d'un mouvement, de rectifier celui-ci continuellement au gré des constats d'erreurs dans la trajectoire. Cette

correction continue est permise par une surveillance de son bon déroulement donnant lieu à une éventuelle rectification et ainsi apprendre à effectuer le bon mouvement.

Cette mise en œuvre de boucle fermée d'apprentissage est ici appliquée à une action physique. Mais cela est tout à fait valable pour des applications plutôt cognitives comme l'apprentissage de concepts de haut niveau.

La cybernétique explore les mécanismes de rétroaction (Wiener, 2019) dans le contrôle des systèmes de manière générale, et il peut s'agir autant de systèmes physiques que cognitifs. Ainsi, les retours d'informations sont nécessaires également pour ajuster les processus cognitifs et comportements. Ceci peut donc également s'appliquer chez l'individu à la régulation d'un apprentissage, par la surveillance des résultats en vue d'ajustements basés sur les retours (Zimmerman, 1989). D'ailleurs, des systèmes de rétroactions peuvent être utilisés pour de l'apprentissage adaptatif qui consiste en un système qui adapte le contenu aux besoins de l'apprenant en temps réel (Holland, 1992). Cette idée d'ajustement en temps réel pose les bases nécessaires à l'adaptation dans un contexte de systèmes complexes. Au-delà de l'apprentissage, ces boucles de rétroaction sont nécessaires au traitement de l'information d'un individu de manière générale, de la perception à la résolution de problèmes et la prise de décision (Anderson, 1993). Exactement à la manière de l'apprentissage moteur, les individus ajustent leur résolution de problèmes selon les informations qu'ils reçoivent en retour. C'est-à-dire que l'adaptation se fait en cours de résolution de problème, pendant le processus décisionnel même (Posner & Rothbart, 2000).

Ce concept de rétroaction a été fondamental dans le domaine de l'apprentissage automatique (Rumelhart et al., 1986). La technique de rétropropagation permet de rendre l'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels efficace. Il s'agit là aussi de la rétropropagation des erreurs constatées entre les sorties prédites et les sorties souhaitées pour pouvoir ajuster en conséquence les poids des connexions entre les neurones.

La boucle de rétroaction permet un apprentissage. Les informations en retour sont essentielles pour ajuster l'action afin de procéder à son amélioration continue pour un résultat optimal. Après ce constat, la question de la situation de cette boucle, et plus généralement du processus d'apprentissage, se pose. La partie suivante aborde le cadre dans lequel se place ce processus.

3.1.3.2 Situation du processus d'apprentissage

Cette partie montre le cadre dans lequel le processus d'apprentissage doit s'inscrire concrètement. Cette partie détaille donc ce qui constitue le processus d'apprentissage, où il se situe, c'est-à-dire quel est son support.

Différentes théories sur l'apprentissage ont vu le jour et ont souligné un lien étroit avec l'environnement, ses stimuli et réponses, et les comportements qu'il renforce par ses récompenses positives ou négatives, et ce très tôt avec le behaviorisme (Skinner, 1957). Certains courants de pensées considèrent que les processus mentaux impliqués dans l'apprentissage d'un individu (perception, mémoire, résolution de problème) sont internes, comme mentionné dans le Chapitre 2 (Bandura & Walters, 1977; Piaget, 2005). Et les

connaissances qui en résultent sont gérées en interne. Est aussi soulignée, la nécessité d'un comportement actif permettant à l'individu la découverte des concepts et sa propre compréhension (Bruner, 1961), l'idéal étant un enseignement adapté à son niveau. L'expérience est en effet en toute logique mise en avant afin de permettre une boucle d'apprentissage comportant cette expérience qui est à la source des observations et des rectifications et conceptualisations (Brown et al., 1989; Kolb, 2014). Il est à noter qu'une charge cognitive réduite rend l'apprentissage plus efficace (Mayer et al., 1996; Sweller, 1988). C'est-à-dire qu'une simplification des informations à traiter permet un meilleur apprentissage. Il en va de même pour l'utilisation de supports visuels et de représentations et organisations graphiques.

Tout ceci est centré sur l'individu mais certaines théories vont plus loin. Elles ne sont pas forcément contradictoires, mais peuvent être vues au contraire comme complémentaires. Par exemple, selon le constructivisme, il y a bien un apprentissage par un comportement actif et par l'expérience en interagissant avec l'environnement pour que l'individu construise activement sa propre compréhension. Mais cet environnement se compose aussi des autres individus. L'apprentissage n'est donc pas seulement un processus individuel mais également social (Piaget, 1970; Vygotsky & Cole, 1978). Il y a un apprentissage social. Les individus apprennent par l'observation des autres. Puis ces observations sont intégrées dans leur propre comportement (Bandura & Walters, 1977). Sur ce principe, l'apprentissage s'inscrit donc dans des situations sociales réelles, plus précisément en prenant part à des communautés de pratiques (Lave & Wenger, 1991). L'apprentissage, comme la cognition en général, est situé. Il ne se limite pas à un vase clos qui serait l'individu, séparé de son environnement comme dans la conception cognitiviste (Lave & Wenger, 1991).

L'avènement des réseaux de communication et des technologies du numérique ont amplifié cette dimension sociale de l'apprentissage et de la connaissance. Cela a donné lieu au connectivisme (Downes, 2005; Siemens, 2005). Selon le connectivisme, il n'existe pas seulement deux types de connaissance que sont le type qualitatif et le type quantitatif. Il vient ajouter un troisième type, qui est le type distribué. C'est-à-dire que la connaissance s'étend sur plusieurs entités. La connaissance connective se concentre sur les interactions qui existent entre ces entités. Pour comprendre la différence, Downes illustre les différents types de la manière suivante :

- Pour le type qualitatif, par exemple une pomme qui serait qualifiée de rouge. Ceci n'est pas vraiment une caractéristique intrinsèque de la pomme mais, dans ce cas précis de la couleur, une longueur d'onde reflétée dans des conditions de luminosité considérées comme normales. Cette pomme apparaîtrait différemment dans d'autres conditions. En ce sens, cette propriété est interprétative ;es
- Pour le type quantitatif, il s'agit de l'énumération d'éléments d'une catégorie, comme le fait de dire qu'il y a vingt enfants qui sont des élèves dans une cours de récréation. Peut-être que l'un d'entre eux vient d'être exclus et n'est donc plus élève, ou que l'un d'entre eux est trop âgé pour être catégorisé comme enfant ce qui fausse le décompte. On voit que cela est encore une fois dépendant du point de vue ;
- Pour le type connectif, ou émergent, il s'agit de cette interprétation mais où des connexions existent entre les entités qui forment un tout distinct, supérieur à la

somme des entités. Par exemple, la vague formée par des dominos qui tombent les uns à la suite des autres, ou l'image formée par les pixels d'un écran.

La connaissance est donc toujours interprétative dans le sens où il ne s'agit pas d'un fait objectif et décorrélé de tout contexte, mais qu'au contraire une association d'entités est nécessaire pour faire sens. Ce concept d'association d'entités rappelle « la société de l'esprit » de (Minsky, 1986) et les systèmes multi-agents qui, comme montré dans le Chapitre 2 précédent, semblaient mieux répondre aux problématiques et contextes complexes des organisations actuelles.

Métaphore 3.1

A partir de cette conception, un parallèle est établi entre l'organisation (société) et le cerveau (réseau de neurones). Donner du sens à quelque chose est le fait d'organiser des entités. Le sens a donc la même signification du point de vue social et du point de vue neuronal. Le sens, ou la connaissance, est un phénomène émergent émanant des connexions entre les entités sous-jacentes. Socialement, les entités sous-jacentes sont les individus. Mentalement, les entités sous-jacentes sont les neurones. Downes (Downes, 2005) va même jusqu'à établir une équivalence avec l'exemple du langage en affirmant que sa dimension neuronale et sa dimension sociale ont la même origine, les mêmes caractéristiques et sont intervertibles.

Cette partie a montré que le processus d'apprentissage consistait en une boucle expérientielle pour exister grâce à des informations en retour résultant des expériences. Elle a également montré que cette boucle d'apprentissage ne se situe pas simplement dans la tête d'un individu mais peut être sociale et distribuée sur plusieurs individus, ou entités de manière générale. Ni le niveau individuel ni le niveau social ne sont occultés. Ils sont pris en compte ensemble et l'accent est mis sur les interactions.

Ces caractéristiques fondamentales pour l'existence de l'apprentissage semblent bien s'apparier avec celles de l'organisation dont l'agencement doit dépendre des conditions. La fusion de ces deux notions s'applique bien au cas de l'organisation apprenante.

3.1.4 Le processus décisionnel de maintenance

Un processus générique de prise de décision dans un contexte de maintenance peut être établi à partir de trois modèles reconnus. Le premier, du domaine stratégique militaire utilisé dans différents contextes comme l'entreprise : le modèle OODA (Boyd, 2018). Le deuxième, de l'ingénierie des processus et amélioration continue, utilisé notamment en production et maintenance industrielle, le cycle PDCA (Deming, 1986). Le troisième, de la prise de décision en situations d'urgence en aéronautique, pour structurer la prise de décision rapide et utilisé en maintenance aéronautique : le modèle FOR-DEC (Hörmann, 1994).

Le modèle OODA se décompose de la manière suivante : 'Observe' (observer), 'Orient' (orienter), 'Decide' (décider), 'Act' (agir). Ces étapes de prise de décision sont pertinentes mais, en se concentrant sur le développement d'une prise de décision dans un contexte

complexe, il est pertinent d'ajouter une étape supplémentaire de projection dans le futur. Cette étape, empruntée au cycle PDCA ('Plan', 'Do', 'Check', 'Act' or 'Adjust') est intercalée entre la phase d'orientation, qui correspond à la compréhension de la situation, et la phase de décision. Dans le contexte de prise de décision de maintenance dans l'aéronautique, la mise en application de la décision peut être la plupart du temps externalisée, et ne représente pas le cœur du sujet. Cela correspond bien aux étapes du modèle de prise de décision rapide FOR-DEC : 'Fact' (faits), 'Options', 'Risks & Benefits' (risques et bénéfices), 'Decision' (décision), 'Execution' (exécution), 'Check' (vérification). Les étapes d'exécution et de vérification, étant la plupart du temps déléguées et n'étant pas centrales, peuvent être agglomérées en une étape d'observation et d'évaluation qui est néanmoins cruciale pour permettre un processus d'apprentissage.

Le processus décisionnel générique de maintenance obtenu, qui sera appelé par son acronyme DUPCA, issu de la réadaptation et fusion de ces trois modèles, se décompose comme suit :

1. Detect : Détection d'évènement inhabituel ;
2. Understand : Compréhension de sa cause et de l'éventuel problème soupçonné ;
3. Project : Projection de ses conséquences dans le futur ;
4. Choose : Décision de l'action à mener ou non pour minimiser l'impact économique d'une immobilisation imprévue, et plus rarement, parer à d'éventuels incidents (problèmes techniques uniquement), voire accidents ;
5. Assess : Observation et évaluation de la performance de la décision au regard des effets attendus.

Ces différentes phases épousent bien les différentes étapes du processus décisionnel décrit par (Endsley, 1995) comprenant la conscience de situation, représentée dans la Figure 2.1. Il est donc possible de classer ces différentes phases dans les différentes étapes de Endsley car elles s'inscrivent pleinement dans le modèle, comme le montre le Tableau 3.1 : la perception des éléments pertinents, la compréhension de leur signification et la projection de leur état futur. En y ajoutant la décision et une étape d'analyse des conséquences, positives ou négatives de cette décision, tous les éléments nécessaires à une boucle de 'feedback' sont réunis pour maintenir une conscience de situation dynamique.

Tableau 3.1 : Croisement des étapes décisionnelles génériques de maintenance et des étapes décisionnelles de Endsley.

Étape de Endsley	Niveau 1 Perception	Niveau 2 Compréhension	Niveau 3 Projection	Décision	Performance
Étape du processus	Detect	Understand	Project	Choose	Assess

Une deuxième dimension à ce classement peut être ajoutée : celle des trois niveaux de conduite établis par Rasmussen (1983) qui vont de la mise en œuvre des compétences à la mise en œuvre de connaissances, en passant par celle de règles. Le niveau des compétences concerne des fonctions perceptives ou exécutives d'une complexité moindre, ou de plus bas niveau, par rapport au niveau des règles, lui-même d'une complexité moindre que celui des connaissances. Ce processus décisionnel concerne les trois niveaux de conduite de Rasmussen

(1983) comme le montre le

Tableau 3.2. La détection d'un événement inhabituel (Detect) et l'évaluation de la performance de la décision (Assess) relèvent principalement du niveau compétence, car elles reposent sur des automatismes et une expérience pratique. La compréhension de la cause du problème (Understand) et la décision de l'action à mener (Choose) s'appuient sur le niveau règle lorsque des procédures existent, et sur le niveau connaissance lorsque la situation est nouvelle ou complexe. Enfin, la projection des conséquences futures (Project) relève entièrement du niveau connaissance, car elle nécessite une analyse prospective et une bonne connaissance du système dans son contexte d'utilisation.

Métaphore 3.3

Dans une comparaison avec le cerveau vis-à-vis des niveaux de Rasmussen, le niveau des fonctions les plus élevées du cerveau, comme l'interprétation de la situation et les planifications en fonction des valeurs et des buts généraux dans la vie, correspondrait au niveau des connaissances. La plus simple identification d'une situation et son association à une procédure déjà connue correspondrait au niveau des règles. Enfin, des réponses simplistes voire ne montant pas même au cerveau mais demeurant localisées dans les parties perceptives et exécutives telles un réflexe, correspondrait au niveau dit des compétences. En effet le réflexe de retrait par exemple, consiste en une réponse musculaire pour le retrait immédiat d'un membre à une sensation de douleur ou de brûlure. Il s'agit d'une réponse immédiate et locale, c'est-à-dire dont aucune étape du processus ne passe par le système nerveux central qu'est le cerveau (Kandel et al., 2000).

Tableau 3.2 : Croisement des étapes décisionnelles de maintenance et des niveaux de Rasmussen

Niveau de Rasmussen	Compétence	Règle	Connaissance
Étape du processus	Detect - Assess	Detect - Understand - Choose	Understand - Project - Choose

La répartition des rôles entre différents agents d'une organisation, qu'ils soient des agents humains ou des agents machines, s'inspire des principes de cognition distribuée (Hutchins, 1995b) ainsi que de complémentarité des compétences, de redondance, et de vérification croisée (Salas et al., 2008). Lorsque l'on applique ce modèle au terrain, par exemple l'agent HM, expert humain en traitement de données, joue un rôle similaire aux instruments dans un cockpit, en fournissant des données critiques pour la détection des anomalies. L'agent SE, expert métier en maintenance, interprète ces données et prend des décisions éclairées, agissant comme le pilote non-'flying' (PNF) qui se concentre sur l'analyse de la situation et les décisions dans le modèle de Hutchins. Enfin, l'agent FR, au contact du client, transmet les décisions et assure la coordination avec l'environnement externe, jouant un rôle comparable au pilote 'flying' (PF) qui se concentre sur le pilotage. Cette répartition des rôles représentée dans le Tableau 3.3 permet de créer un système où la cognition est distribuée entre les agents, ce qui améliore la résilience et la performance globale.

Tableau 3.3 : Exemple : croisement des étapes décisionnelles de maintenance et de l'organisation composée des trois agents

Agent	HM	HM - SE	HM - SE - FR	SE - FR	FR
Étape du processus	Detect	Understand	Project	Choose	Assess

La classification des phases décisionnelles vis-à-vis des modèles de Endsley et Rasmussen permet de situer ces étapes du processus de maintenance dans un tableau croisé comme présenté sur le Tableau 3.4. Comme souvent, la classification ou la définition d'un élément revient à le réduire, en particulier dans un système complexe. Ici, chaque phase est donc classée de manière simplifiée puisque les niveaux de Rasmussen et les étapes de Endsley sont quelque peu liés les uns aux autres. Certaines phases figurent donc sur deux cases lorsque l'accent ne peut pas être mis seulement sur l'une d'entre elles.

Tableau 3.4 : Croisement des niveaux de conduite (Rasmussen, 1983) et des étapes de processus décisionnel de (Endsley, 1995).

Endsley Rasmussen	Niveau 1 Perception	Niveau 2 Compréhension	Niveau 3 Projection	Décision	Performance
Connaissance		Understand	Project	Choose	
Règle	Detect	Understand		Choose	
Compétence	Detect				Assess














Ce croisement donne une vision intéressante des différents requis pour la prise de décision qui est au cœur de la maintenance. Les étapes de Endsley permettent d'identifier les différentes fonctions nécessaires au bon déroulement du processus. Les niveaux de conduite de Rasmussen permettent d'identifier les niveaux de complexité des phases et ce qui peut éventuellement être automatisable. Cependant, si cette représentation semble assez complète pour l'étude d'un processus décisionnel à un niveau individuel, elle apparaît insuffisante pour l'étude d'un processus décisionnel à un niveau organisationnel. La nature complexe de l'activité induit une répartition des compétences et connaissances sur différents agents. Le processus peut donc comporter non seulement un agent, humain ou machine, mais plusieurs. La dimension de la répartition des tâches est donc nécessaire pour se rendre compte de cette problématique de répartition sur différentes parties prenantes, comme présenté dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Croisement de l'organisation précédente et des étapes de processus décisionnel de (Endsley, 1995)

Endsley Système multi- agents	Niveau 1 Perception	Niveau 2 Compréhension	Niveau 3 Projection	Décision	Performance
HM	Detect	Understand	Project		
SE		Understand	Project	Choose	
FR			Project	Choose	Assess

La représentation de toutes les dimensions simultanément souligne la complexité de la boucle de maintenance quant à la nature de ses différentes phases et la nécessité d'obtenir des outils flexibles pour la gérer et la coordonner. Dans l'espace d'analyse suivant ces dimensions, le Tableau 3.6 montre que le processus décisionnel de maintenance présente un parcours multi-niveau et complexe sur plusieurs plans. Cela reflète la complexité du processus de maintenance, d'autant plus qu'il s'agit d'un processus générique.

Tableau 3.6 : Croisement du système multi-agents, des niveaux de conduite de (Rasmussen, 1983), des étapes de processus décisionnel de (Endsley, 1995) et de l'organisation précédente

Endsley Rasmussen	Niveau 1 Perception	Niveau 2 Compréhension	Niveau 3 Projection	Décision	Performance
Connaissance		 	  	 	
Règle		 		 	
Compétence					
Rasmussen Processus	Detect	Understand	Project	Choose	Assess

À défaut d'être précisément exploitable, cette représentation rend compte du fait qu'il est compliqué de déterminer quel agent nécessite quelle information à un instant donné. Ceci ne semble pas pouvoir être fixé et généralisé mais semble plutôt être du cas par cas selon les situations. Un système de soutien de chaque agent dans l'orientation de ses communications est donc souhaitable tout en veillant à conserver son autonomie. Une bonne conscience de situation est nécessaire, mais avec une quantité d'information dimensionnée en fonction de la situation concernée. Là est tout l'intérêt d'une solution pour augmenter l'organisation dans ses prises de décisions : guider chaque agent pour lui faciliter la tâche sans le submerger d'information, tout en lui laissant l'autonomie nécessaire à l'expression de son expertise. Comme mentionné précédemment, le problème concerne tous les niveaux organisationnels d'Ardoino (Ardoino, 1978) simultanément. La solution doit donc prendre en considération cet aspect multi-niveaux. Dans la pratique, certains niveaux sont particulièrement mis en avant. Ici, les niveaux organisationnels et individuels sont particulièrement considérés. Une approche

sous l'angle d'ajustements au niveau du fonctionnement individuel ou interindividuel pour faire émerger une meilleure adaptabilité au niveau organisationnel est envisagée. Ceci correspond donc à une approche tant au niveau individuel qu'organisationnel, à la manière d'un système multi-agents et des communications stigmergiques.

3.1.5 Synthèse

Face au besoin d'un outil capable de s'adapter non pas à un poste spécifique, mais à n'importe quel poste dans sa collaboration avec les autres – et non pas à un niveau de conduite de Rasmussen spécifique ou à une étape de processus décisionnel particulière de Endsley, mais à tous –, un défi de modélisation se présente. En effet, une telle complexité impose la création d'un nouvel outil d'aide à la prise de décision collaborative et d'apprentissage organisationnel à partir de zéro. Un tel outil, loin du système expert spécialisé, se doit d'être extrêmement généraliste dans sa capacité à collecter les données, les intégrer et les restituer afin de guider l'attention, tel un cerveau dans sa cognition. C'est pour cela que le modèle de SMA, par son aspect multi-niveau et complexe, peut couvrir tous ces sujets et viser l'émergence d'une cognition collective. Pour ce faire, la partie suivante reprend donc chaque discipline prépondérante des sciences cognitives pour déterminer les fonctions nécessaires au SMA, à la lumière des connaissances qu'elles apportent sur la cognition.

3.2 Construction d'un modèle de système multi-agents

3.2.1 Approche pour la modélisation

Le modèle de système multi-agents (SMA) proposé repose sur les apports des six disciplines des sciences cognitives : philosophie, neurosciences, linguistique, psychologie, intelligence artificielle et anthropologie (G. A. Miller, 2003). Chacune apporte des concepts essentiels à la conception d'un modèle de SMA apte à soutenir une organisation autoapprenante, listés sur la Figure 3.4. Cette section synthétise l'approche permettant la modélisation et n'a pas pour vocation de présenter à nouveau une bibliographie détaillée, soutenant cette approche. Cependant, ces recherches et raisonnement sous-jacents étant fondamentaux, ils sont disponibles de manière plus développés en Annexe A : Les sciences cognitives derrière la modélisation.

Philosophie : Le modèle s'inscrit dans une logique non dichotomique entre système et environnement, inspirée des concepts d'autopoïèse (Maturana & Varela, 1991) et d'énaction (Varela et al., 1993). Il s'agit d'un SMA intégré à l'organisation, co-crédant une nouvelle réalité plutôt que reproduisant la réalité préexistante. Cette perspective épistémologique fonde une approche opérationnelle basée sur la transformation réciproque de l'organisation et du modèle, comme illustré Figure 3.2.

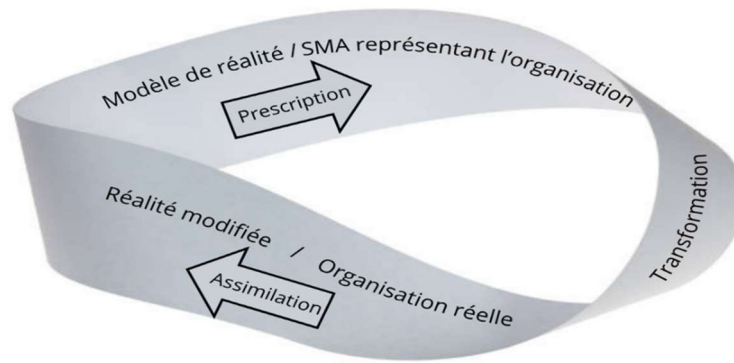


Figure 3.2 : Cocréation entre le SMA et l'organisation

Neurosciences : Les principes du connectome (Sporns et al., 2005), c'est-à-dire l'ensemble des connexions, et de l'espace de travail neuronal global (Dehaene & Changeux, 2011), c'est-à-dire la manière dont l'objet d'une cognition doit s'étendre à un grand nombre de fonctions pour qu'il soit conscient, inspirent la structuration du SMA. L'interconnexion modulée des agents, sur le modèle des circuits neuronaux et des seuils d'activation, permet une gestion adaptative de la complexité. Le traitement distribué et l'émergence de la conscience par diffusion élargie guident la conception d'un système où certains agents accèdent, selon le contexte et certains seuils de déclenchement, à une métacognition collective comme représenté dans la Figure 3.3.

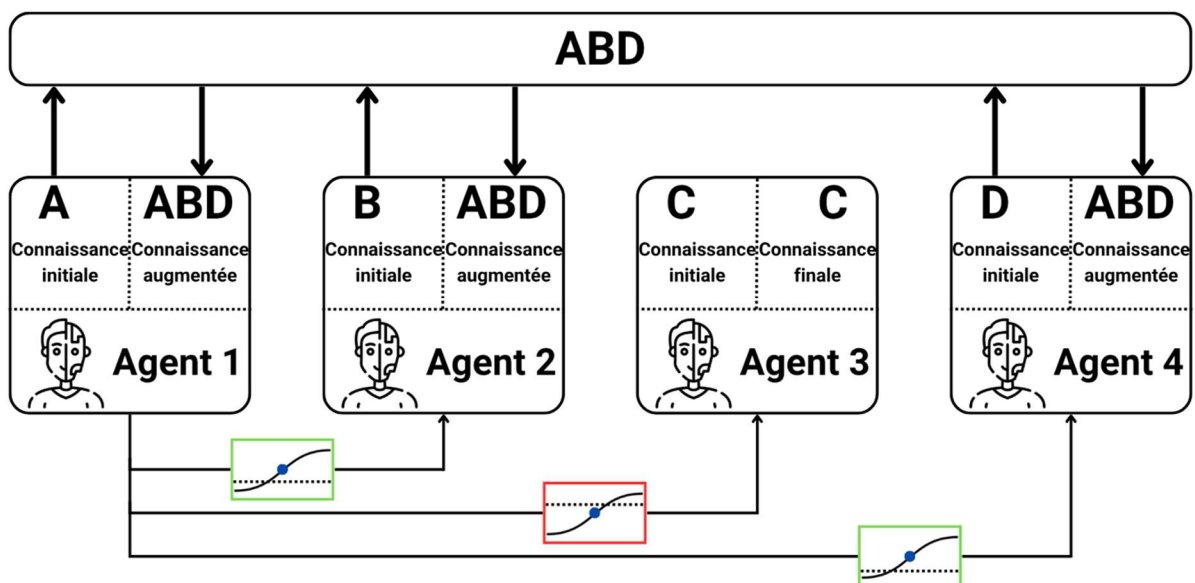


Figure 3.3 : Seuils de déclenchement de sollicitations d'agents tiers pour une collaboration

Linguistique : La fusion conceptuelle (Merge) des éléments mentaux (Chomsky, 1995) et l'émergence du langage par interconnexion physique des zones de Broca et Wernicke (Geschwind, 1970) soulignent le rôle des connexions dans la construction de sens et de fonctions cognitives de niveaux supérieurs. Les métaphores (Lakoff & Johnson, 2008) sont considérées comme outils de design systémique et de compréhension, à l'image de la métaphore du cerveau utilisée dans ce travail.

Psychologie : L'intelligence collective repose sur la qualité des interactions plus que sur l'intelligence individuelle (Woolley et al., 2010). Le modèle vise donc à favoriser une compréhension mutuelle entre les agents, via des processus de décision partagée tels que décrits dans la Section 2.4, et à concevoir des interfaces stimulant cette compréhension.

Intelligence artificielle : Trois modèles d'agents sont combinés : cognitif, apprenant et stigmergique (Russell & Norvig, 2016; Sutton, 2018; Bonabeau, 1999a). Concernant le côté cognitif, l'humain en tant qu'agent possède déjà une cognition propre. Mais son interaction avec le SMA lui permet d'accéder à des mémoires collectives, à une extension de ses capacités perceptives le rendant apprenant et à des indicateurs stigmergiques facilitant l'apprentissage organisationnel.

Anthropologie : Le SMA est conçu comme un dispositif culturellement situé, fondé sur l'observation des pratiques et des logiques collectives (Hutchins, 1995a). L'intégration des utilisateurs se fait par co-conception et validation empirique (usages réels, langages partagés, symboles). La conception tient compte de la dimension sociale et symbolique des métaphores utilisées, pour assurer un alignement entre les dynamiques humaines, techniques et organisationnelles.

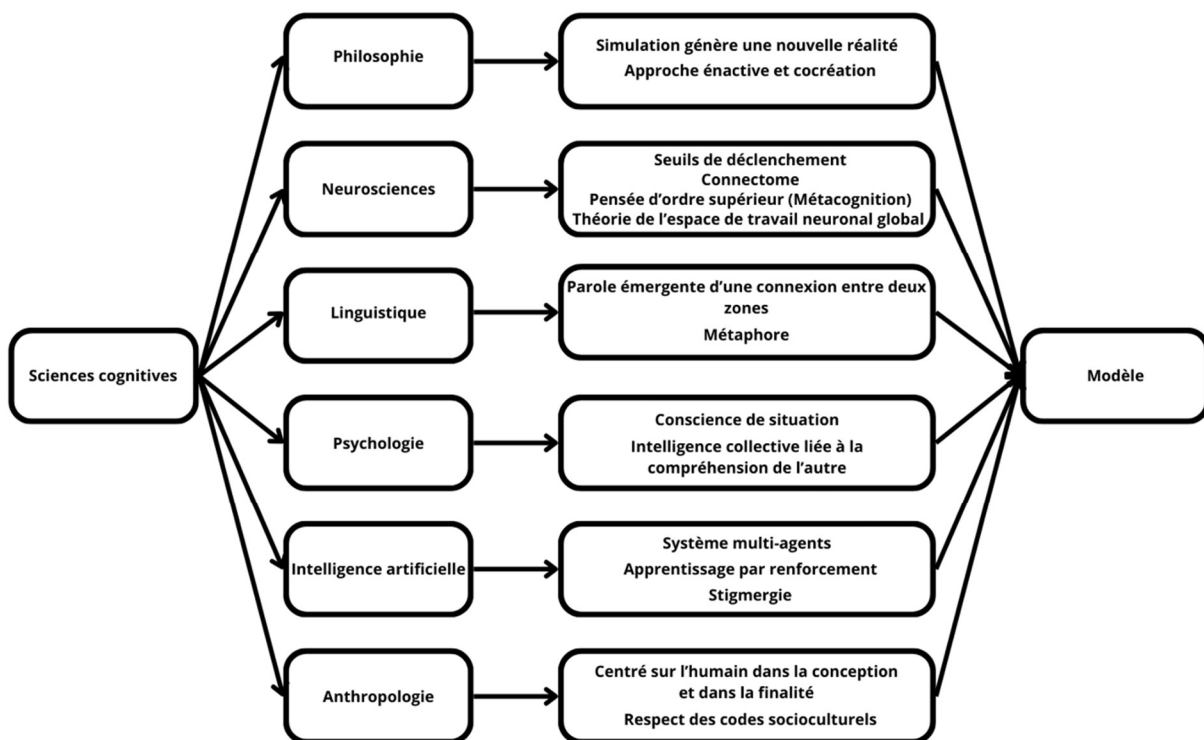


Figure 3.4 : Impact des disciplines des sciences cognitives sur les caractéristiques nécessaires à la modélisation

Le modèle SMA se structure selon un principe d'interconnexion adaptative, stimulée par la métacognition et la diffusion de l'information. Il facilite les processus collectifs et s'inscrit dans les pratiques humaines réelles. Il vise à faire émerger une cognition distribuée propre à l'organisation, répondant ainsi aux objectifs d'une organisation apprenante.

3.2.2 Le modèle d'agent

Le modèle du système multi-agents semble particulièrement adapté au contexte. Comme l'ont montré les parties précédentes, prendre en compte toute la complexité interne de l'organisation pour la rendre apprenante, implique une approche multi-niveau. De plus, les phases du processus décisionnel passent par différentes fonctions et niveaux de modèles tels que les étapes de Endsley et les niveaux de Rasmussen. Ceci met en œuvre plusieurs agents.

Historiquement, les différentes fonctions sont assurées par des agents humains, mais tendent à s'automatiser et laisser place à des agents machines, notamment pour assurer les tâches de plus bas niveau (celui des compétences) comme les détections de tendances et ruptures dans les données temporelles, ou l'isolement des causes à effets avec des réseaux Bayésiens dans les dépannages de démarrages. Cependant, la présence d'agents humains est un besoin qui continue de s'imposer et qui perdurera pour plusieurs raisons : premièrement, les fonctions de haut niveau tel que le niveau des connaissances de Rasmussen n'est pas encore adapté à des agents machines fonctionnant avec une intelligence artificielle pour des raisons de spécialisation évoquées dans la bibliographie ; deuxièmement, pour des raisons de responsabilités et de sécurité concernant des décisions critiques, qui ne peuvent pas forcément être déléguées à des agents machines en particulier les décisions finales (Parasuraman et al., 2000) ; et surtout, les cas de maintenance rencontrés qui ne présentent pas de données massives mais peuvent être uniques ou rares, ce qui correspond à des situations mieux gérées par des humains (Endsley, 2017; Lake et al., 2015).

Les processus internes des agents machines seront déterminées par leur finalité et les avancées techniques comme l'intelligence artificielle. Les agents humains, experts de différents domaines, possèdent leurs processus et cognition propres. Ce que la partie précédente a mis en évidence, à travers la revue des sciences cognitives, est l'importance prépondérante du connectome, c'est-à-dire de la manière dont les agents et fonctions sont connectés entre eux. Cette étude n'a pas la prétention d'indiquer comment changer les outils machines développés selon de fines expertises ni les raisonnements des experts directement, mais de fournir les conditions nécessaires à l'émergence d'une cognition collective étendue, d'autant plus que les processus internes évoluent en fonction de l'environnement fourni.

La sous-discipline de l'intelligence artificielle a permis de détailler les types d'agents existants dans la littérature sur les SMA, ce qui permet de déterminer les besoins de chaque agent pour fonctionner correctement. Le choix se porte sur un agent hybride pour être complet : l'agent cognitif, apprenant et stigmergique. L'aspect cognitif est donc assuré en interne et sera favorisé par l'environnement et ne constituera donc pas le cœur du modèle, comme expliqué précédemment, du moins au niveau individuel. Les aspects apprenant et stigmergique, quant à eux, seront particulièrement développés dans le modèle. En intelligence artificielle, le processus développé permettant de rendre l'agent apprenant par l'expérience, est plus particulièrement l'apprentissage par renforcement (LAPAN, 2018). Ce concept, qui introduit une notion de récompenses, positives ou négatives, permet de déterminer les éléments nécessaires à l'apprentissage de l'agent dans cette partie consacrée à sa modélisation.

L'organisation envisagée comporte un ensemble d'entités, qui sont les agents qui participent aux prises de décisions. Les agents, comme vu dans le chapitre précédent, sont des entités

autonomes. Ils correspondent à une fonction, et peuvent donc aussi bien être humains que machines dans l'organisation.

Le modèle proposé est générique pour tous les agents. Cela permet de respecter deux principes, conditions de la capacité d'auto-organisation : (1) les spécifications minimales, qui permettent de conserver l'autonomie de l'agent et sa possibilité de changer autant dans sa fonction que dans sa structure ; et (2) le tout dans la partie, c'est-à-dire que chaque agent et son fonctionnement reflète la totalité du système multi-agents (Morgan, 1999).

Cependant, si la spécification doit se faire le moins possible, la définition d'une entité peut se faire par la définition de son champ d'interactions (Maturana & Varela, 1991). La Figure 3.5 détaille les trois types d'interactions qui ont été établis entre un agent et son environnement :

- L'action, par laquelle l'agent agit sur son environnement ;
- L'observation, grâce à laquelle l'agent peut analyser son environnement ;
- La récompense, un retour permettant d'évaluer la situation et notamment la qualité des résultats engendrés par ses actions.

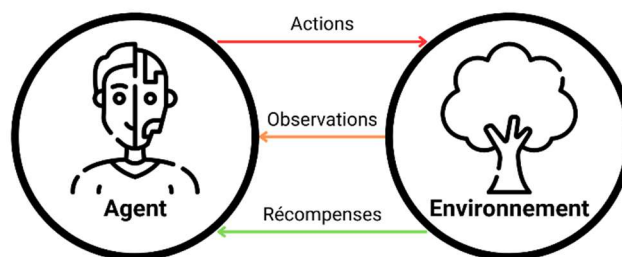


Figure 3.5 : Un agent et sa communication avec l'environnement

La seule décomposition de ces flux de données clarifie les éléments nécessaires à la collaboration et l'apprentissage organisationnel. Plus précisément, sont détaillées ici les différentes composantes issues de l'apprentissage par renforcement, entrant en jeu pour modéliser un agent, et respectant les trois types d'interaction précédents :

- Au niveau global, externe à l'agent :
 - o Environnement : C'est le monde dans lequel l'agent évolue. Il peut s'agir d'un jeu vidéo, d'un simulateur de robotique, d'un marché financier, etc. L'environnement produit des observations (état actuel) et des récompenses en réponse aux actions de l'agent.
Dans le cadre d'application à la maintenance, il s'agit principalement des autres agents, humains ou machines, qui composent l'organisation correspondant aux activités de maintenance.
- Au niveau de l'agent :
 - o Agent : L'agent est l'entité qui interagit avec l'environnement. Il prend des décisions en sélectionnant des actions à partir de sa politique (politique de décision). Ces actions ont un impact sur l'environnement.

- Au niveau des interactions de l'agent avec son environnement :
 - Actions : Les actions sont les décisions prises par l'agent pour interagir avec l'environnement. Elles peuvent être discrètes (par exemple, déplacer un pion d'échecs) ou continues (par exemple, la vitesse d'un robot). Comme vu avec les niveaux de Rasmussen, dans la décision collaborative pour la maintenance, des actions de plus ou moins haut niveau sont nécessaires. Mais le système devra dans la mesure du possible décomposer les actions en petites actions simples et de plus bas niveau possible, pour avoir plus de chances de s'intégrer dans les habitudes des utilisateurs (Gollwitzer, 1999 ; Wood & Rüniger, 2016).
 - Observations : Les observations sont les informations que l'agent reçoit de l'environnement pour comprendre l'état actuel. Elles peuvent inclure des données sensorielles, des images, des données numériques, etc.
 - Récompenses : Les récompenses sont des signaux numériques fournis par l'environnement pour évaluer la qualité des actions de l'agent. L'agent cherche à maximiser la somme des récompenses cumulées au fil du temps.

En outre, un agent doit disposer de composantes purement internes, permettant de gérer les trois types d'interaction précédentes :

- Politique : La politique est la stratégie de décision de l'agent. Elle détermine quelle action l'agent doit prendre en fonction de l'observation actuelle. Le but est d'apprendre une politique qui maximise les récompenses cumulatives au fil du temps. Dans la maintenance, c'est là qu'interviennent les compétences ou la connaissance métier de l'agent en question.
- Apprentissage : C'est le processus par lequel l'agent améliore sa politique au fil du temps. L'apprentissage peut être basé sur la valeur (estimation de la récompense attendue) ou sur la politique (stratégie de sélection d'action).
- Algorithme d'apprentissage : Il s'agit de l'algorithme ou de la méthode utilisée par l'agent pour apprendre et optimiser sa politique. Il peut s'agir d'algorithmes tels que Q-learning (C. J. C. H. Watkins & Dayan, 1992), Policy Gradient (Sutton et al., 1999), DDPG (Lillicrap et al., 2015) qui peuvent être implémentés au sein d'un agent machine. Concernant l'agent humain, il s'agit simplement de sa capacité d'apprentissage par son expérience et à l'aide du système que cette étude vise à tester.

L'apprentissage par renforcement consiste en l'interaction itérative de l'agent avec l'environnement, l'apprentissage à partir des récompenses et des observations, et l'ajustement de la politique pour maximiser les récompenses cumulées. L'objectif final est d'obtenir une politique optimale qui permet à l'agent de prendre des décisions efficaces dans l'environnement donné.

Comme vu dans la bibliographie (Section 2.2.3), un agent sert une fonction à son niveau, c'est-à-dire dans son cadre d'influence, de connaissances et de compétences. Il peut s'associer à d'autres agents pour servir une fonction d'un niveau d'ordre supérieur, intégrant son cadre, celui des autres agents avec lesquels il collabore, et la synergie qui peut émerger de cette collaboration. Il forme ainsi avec eux une agence, qui n'est autre qu'un réseau d'agents, présentée dans la partie suivante.

3.2.3 Le modèle d'agence

L'environnement avec lequel les agents interagissent est composé des autres agents, humains ou machines. Les agents, lorsqu'ils s'associent entre eux, peuvent se compléter non seulement au niveau des compétences pour une tâche qui dépasse leur champ de compétences respectifs, mais également au niveau de leur interactions avec l'environnement si elles sont incomplètes comme sur la Figure 3.6.

Sur ce diagramme, deux agents sont auteurs ou destinataires d'interactions avec leur environnement concernant le même sujet. L'agent 1 agit et reçoit des récompenses mais manque d'observations pour affiner le choix de ses actions. L'agent 2 agit et reçoit des données lui permettant de faire des observations et évaluer la situation. Dans certaines situations, la nature des données n'est pas toujours distincte et les récompenses peuvent par exemple se baser sur les données d'observation, mais ici, le postulat de leur séparation claire est fait. Il est clair que l'incomplétude des interactions de chaque agent entrave son apprentissage. Dans le cas où les actions de l'agent 1 et les récompenses qu'elles génèrent s'appuient sur les fruits du travail de l'agent 2, cela représente non seulement une perte d'information pour l'apprentissage de l'agent 2, mais également une perte du sentiment de reconnaissance vis-à-vis de l'utilité de son activité. De plus, la partie de la bibliographie (Section 2.4.3.2) sur la psychologie de groupe a montré que le sentiment d'appartenance à une équipe avait des vertus motivantes. Une mise en commun de récompenses à un niveau groupal pourrait favoriser cela.

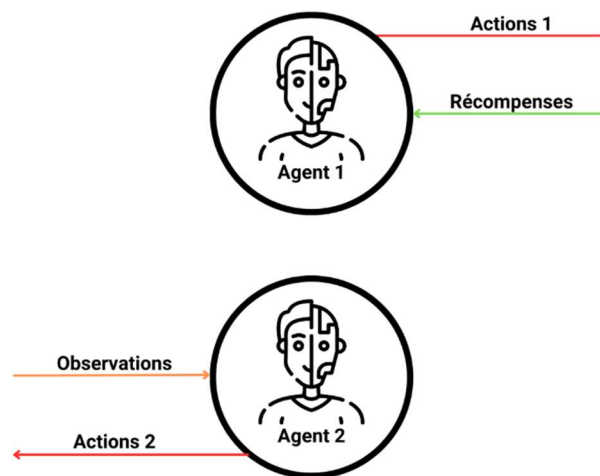


Figure 3.6 : Agents au champ d'interactions incomplet.

Pour ce faire, une agence peut être formée par les agents, autrement dit, une mise en réseau. Pour correspondre à la définition précédente d'un agent, basée sur le champ d'interactions, un agent doit avoir au moins un flux d'information de chaque type pour être fonctionnel. Être fonctionnel signifie pouvoir prendre des décisions pertinentes et apprendre d'elles. Ceci montre comment une agence peut s'avérer indispensable. En se complétant au niveau des flux d'informations, les agents se mettent à jour concernant les données disponibles concernant le problème traité, et peuvent apprendre de l'expérience des autres en plus de leur propre expérience. La Figure 3.7 montre comment deux agents dont le champ d'interaction était initialement incomplet peuvent être complémentaires. Ici, chaque agent partage à l'autre agent inclus dans le processus toutes les interactions qui le concernent : les actions qu'il mène et les observations et récompenses dont il bénéficie. Toutes les interactions

concernant l'agence dans sa globalité sont visibles par chaque agent qui appartient à cette agence. Ceci implique que si l'agence possède assez d'interactions avec l'environnement pour l'apprentissage dans une activité et donc l'ajustement de comportement, alors cela devient le cas de chaque agent qui la compose.

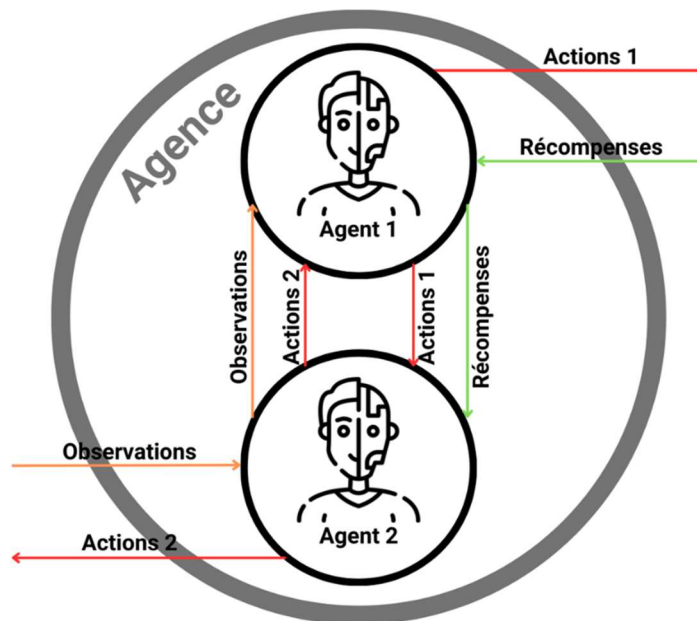


Figure 3.7 : Agence dans un système multi-agents

La maintenance des moteurs d'hélicoptères est évolutive. Les technologies disponibles et les métiers évoluent, donc les agents machines et humains et leurs collaborations changent. Le modèle du système multi-agents n'est pas utilisé ici comme outil de simulation de possibles événements, mais plutôt comme modèle pour guider la conception du système d'aide à la décision collaborative ayant ses qualités comme l'adaptation et l'apprentissage.

Le système multi-agent proposé est donc un système qui doit permettre de représenter un ensemble d'agents et d'agences, sachant qu'à chaque nouveau processus amenant à une prise de décision collective cette liste d'agents et d'agences impliqués peut être différente. Le SMA doit donc être flexible et adaptatif pour représenter l'évolutivité de l'organisation.

La majorité des agents sont des participants à une collaboration pour une prise de décision. Mais si l'apprentissage basé sur l'expérience des décisions passées peut se faire de manière décentralisée via une communication de type stigmergique entre les agents, à terme, un agent peut aussi avoir pour fonction de trouver les similitudes entre une collaboration en cours et les collaborations passées pour suggérer des éléments de réponses qui ont été concluants. Il est intéressant également de faire cet apprentissage concernant le choix des agents à contacter pour une collaboration. Pour cela, un type spécifique d'agent peut permettre d'analyser les caractéristiques de la composition-même des collaborations (ou agences) passées. Il est donc proposé ici d'associer à chaque agent un rôle, qui est une nouvelle composante, et qui sera spécifique pour chaque processus décisionnel dans lequel l'agent est impliqué. Nous définissons donc les rôles suivants, qui conditionnent leur comportement, à travers leur politique, leurs actions, leurs observations, leurs récompenses et leurs capacités d'apprentissage :

- Collaborateur : il participe à la prise de décision collaborative, en y apportant sa connaissance jugée pertinente dans le contexte donné.

- Cela ne concerne *a priori* que des agents humains, du moins dans l'état initial du système envisagé. Mais des agents machines peuvent être développés, à terme, pour atteindre une autonomie suffisante à une participation sans intermédiaire humain.
 - Médiateur : il est chargé de la médiation entre les agents collaborateurs, notamment la transmission d'information entre eux et les notifications. Il permet également d'émettre des suggestions pour assister les collaborateurs tout au long du processus décisionnel. Il peut s'agir d'éléments aidant à la définition d'un problème en question (catégorie, intitulé), d'aide dans le choix des collaborateurs à solliciter, d'aide dans les options de réponses possibles au problème etc. Ces éléments peuvent lui être fournis par l'agent analogiste pour des raisons présentées dans le point suivant.
 - Ce rôle est assuré par des agents machine. Bien qu'il nécessite initialement des données provenant des comportements des agents humains pour apprendre, à terme, ce rôle semble idéalement exécuté par un agent machine. En effet le volume potentiel de l'information traitée semble élevé, et la mémoire et les calculs statistiques semblent prépondérants dans la performance de cette activité.
 - Analogiste : son rôle est de détecter des modèles et schémas similaires notamment dans les données issues de l'expérience. Ainsi, il peut fournir des informations précieuses à l'agent médiateur pour l'aider dans son assistance des agents collaborateurs. Qu'il s'agisse de l'identification d'un problème, de la composition d'un groupe collaboratif efficace pour ce problème ou les meilleures solutions à apporter, des dispositions et configurations gagnantes peuvent être repérées par l'analyse de ces données d'expérience.
 - Ce rôle doit être assuré par un agent machine. En effet, les motifs à identifier au sein des données issues de l'activité passée peuvent être d'une complexité difficile à appréhender pour un humain, que ce soit par leur disposition dans l'espace ou dans le temps.
- NB : pour les agents machines, il faudrait pouvoir dire quelles spécificités ils ont concernant leur politique et/ou actions et/ou observations et/ou récompenses et/ou apprentissage. Brièvement.

Concernant les agents machines, leur politique interne guidant leurs actions en fonction des observations et récompenses peuvent se baser sur les résultats concluants des expériences faites dans ces travaux. Mais leur apprentissage peut évoluer au cours du temps, par exemple à la suite de tests de différents algorithmes concernant leur apprentissage, si ceux-ci s'avèrent concluants. Pour permettre cette amélioration continue, les rôles sont définis dans les grandes lignes, mais une spécification trop détaillée n'est pas forcément souhaitable, afin de conserver la flexibilité de ces agents, selon le principe de spécification minimum (Morgan, 1999).

La Figure 3.8 montre comment les différents types d'agents peuvent se coordonner pour aider la prise de décisions. Un agent collaborateur initie une collaboration en initiant une requête consistant en une question ou un problème à résoudre, par exemple l'agent C1. L'agent M1 fait la médiation entre lui et les autres agents. Il faut dans un premier temps définir l'agence, c'est-à-dire désigner les autres agents à contacter. L'agent M1 l'assiste dans cette sélection en suggérant les agents probablement pertinents. L'agent A1, lui, fait l'analogie entre cette

situation et des situations passées. Pour cela, il analyse le contenu de la requête qui définit le problème à résoudre et l'équipe sollicitée.

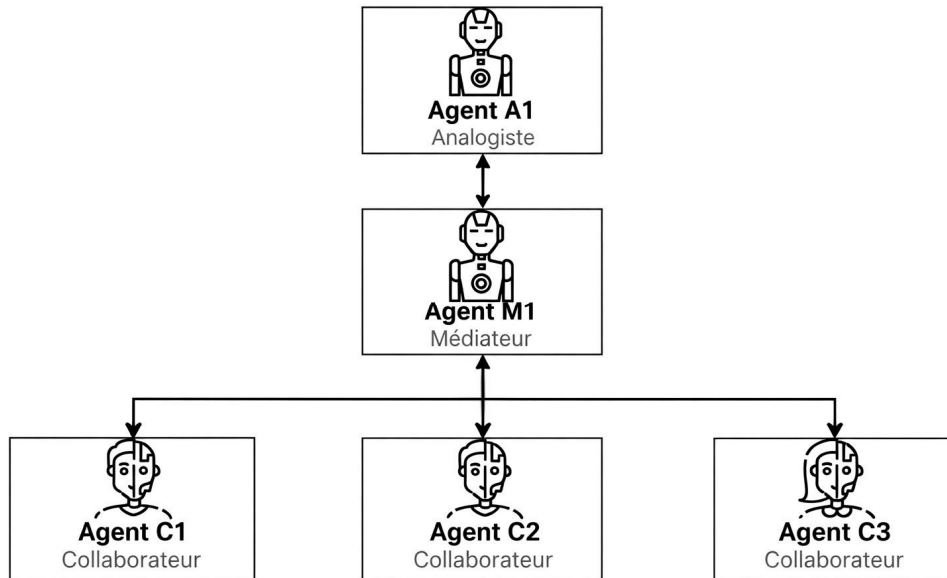


Figure 3.8 : Système multi-agents décisionnel

Ceci permet donc d'assister l'agent collaborateur dans la création de sa requête qui débouche sur une collaboration. Le système multi-agent doit pouvoir fonctionner en toutes situations, y compris via des actions humaines si des agents comme l'agent médiateur ou analogiste (agents machines) n'existent pas encore ou n'ont encore rien appris. Une fois ceci mis en place, il reste à définir ce qu'est concrètement une collaboration et comment les agents peuvent être guidés dans leur processus de prise de décision collaborative, qu'ils soient humains ou logiciels.

3.2.4 Le modèle de prise de décision

Lorsque les experts d'une organisation se consultent pour prendre une décision dans une situation donnée de manière non formelle, les échanges peuvent être désorganisés et fastidieux. De plus, les données de cette collaboration sont oubliées. L'oubli peut concerner l'identité de l'expert qui a été de bon conseil pour ce cas spécifique ; la solution ; et si cette solution a été concluante ou non. Cette perte d'information du passé peut être occasionnée chez un même agent par perte de mémoire ou parce qu'il y a trop d'information ; ou parce qu'un autre agent collaborateur ayant les mêmes compétences s'est occupé des cas similaires ; ou encore parce qu'un nouvel agent en a remplacé un ancien, par exemple en cas de départ à la retraite. Un échange formalisé et cadré au sein d'un système d'aide à la décision collaborative, permettrait en premier lieu de collecter et intégrer ces informations.

Dans un cadre basé sur le modèle multi-agents, l'idéal serait de retrouver le tout dans la partie. Ainsi, la partie, qui est un agent, pourrait prendre des décisions rationnelles en connaissance

de l'information exhaustive. Mais en admettant qu'il soit possible de fournir l'information de manière exhaustive, la bibliographie (Section 2.4.4.2) a montré qu'une trop grande quantité d'information mise à disposition d'un humain dans une collaboration peut avoir des effets néfastes comme l'augmentation du temps de traitement et, dans certains cas, une perte de confiance (Section 2.4.4.1). L'humain, comme le dit l'économiste et sociologue (H. Simon, 1957) et les sociologues des organisations (Friedberg, 2011), ne peut pas être complètement omniscient et prend de décisions basées sur une rationalité limitée. Cela est d'ailleurs valable pour les ordinateurs (H. A. Simon, 1990). Cela signifie que la décision est influencée par les informations à disposition. L'organisation a donc tout intérêt à soutenir la prise de décision en mettant à disposition les informations pertinentes.

Précédemment (Section 3.1.4), le schéma du processus décisionnel (Tableau 3.4) de maintenance analysé à travers les niveaux de Rasmussen et de Endsley a montré que les première et dernière phases (1 et 5) du processus, la perception et l'évaluation de la performance, sont du plus bas niveau de Rasmussen, celui de la compétence. Une automatisation de ces phases est donc envisageable. Néanmoins, les phases centrales (de 2 à 4) touchent au plus haut niveau, celui des connaissances. Leur automatisation est nettement moins accessible et il est nécessaire de conserver une place centrale à l'humain dans ces phases. Mais la réalisation de cette partie transdisciplinaire fait souvent intervenir plusieurs experts qui doivent se concerter, que ce soit au sein d'une même phase, en passant d'une phase à l'autre, ou encore en passant d'un cycle entier à l'autre.

Pour assurer le lien entre les agents, un processus collaboratif peut être guidé tel que présenté sur la Figure 3.9 via un outil, en se basant sur le cadre de décision partagée présenté dans la Figure 2.4, en y intégrant les notions de choix des autres agents à solliciter ainsi que des indicateurs de performance stigmergiques. Ces indicateurs stigmergiques peuvent être générés par les retours des agents participants, pour aider à l'apprentissage, en plus du simple partage de ses connaissances qui peuvent en lui-même améliorer sa propre compréhension et mémorisation des informations (Fiorella & Mayer, 2015).

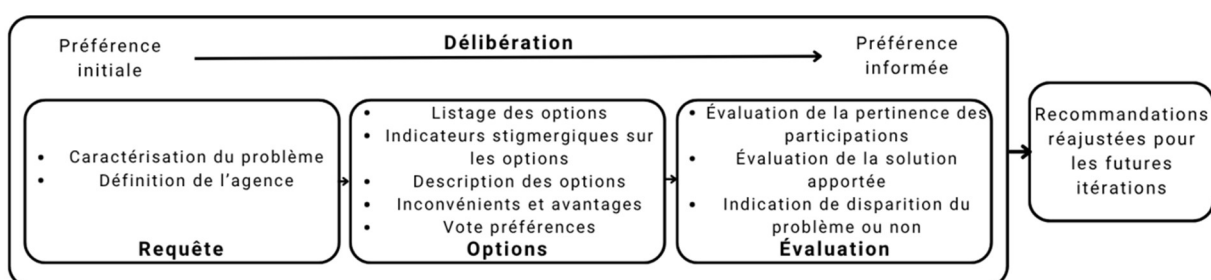


Figure 3.9 : Décision collaborative inspirée de la publication de (Elwyn et al., 2012)

Les indicateurs stigmergiques peuvent être intégrés à plusieurs éléments de la délibération pour la décision collaborative. Ils peuvent aussi représenter différentes métriques comme l'efficacité ou non d'une action qui a fait suite à une recommandation passée dans un contexte similaire. Ils peuvent représenter des métriques liées à la satisfaction du client en question lors des dernières sollicitations. En effet, un juste milieu est à trouver entre des risques de non-action et une sollicitation trop fréquente et inutile pouvant mener à une négligence des

actions demandées. Des indicateurs et métriques liées aux coûts peuvent être également être intégrés. Cependant, comme montré dans la partie sur la psychologie en groupe (Section 2.4.3.2), il faut être vigilant s'il s'agit de métriques liées à la contribution ou la productivité d'un agent humain. Un agent humain ne devrait avoir accès qu'à ses propres indicateurs clé de performance, ou bien qu'ils soient anonymisés ou agglomérés (équipe, service, entreprise entière) s'ils proviennent des autres.

Le système multi-agents physique et déjà existant qu'est l'organisation, nécessite un espace numérique. Cet espace numérique est un support pour un espace dans lequel chaque agent peut être représenté et participer à ces collaborations et dans lequel peuvent se déployer les indicateurs stigmergiques. L'équivalent numérique de tous ces agents forment ensemble un jumeau numérique de l'organisation, abordé dans la partie suivante.

3.3 Applicabilité des modèles proposés

3.3.1 Jumeau numérique et SMA

3.3.1.1 Définitions et considérations préalables

Nous avons vu précédemment que dans l'industrie, de nombreuses tâches cognitives peuvent être soutenues par des techniques et approches différentes, plus ou moins adaptées selon la nature de ces tâches cognitives. Bien que ces tâches soient liées entre elles et complémentaires, leur grande diversité peut rendre difficile une vision exhaustive de l'activité industrielle en question et des paramètres à prendre en compte pour prendre des décisions menant vers la meilleure efficacité globale possible.

Cette agglomération de tâches interdépendantes visant à mener à bien l'activité industrielle peut être vue comme un système complexe. De plus, les collaborateurs qui contribuent à une tâche collective, comme vu précédemment, peuvent ne pas être présents en même temps et le faire de manière asynchrone. Des mécanismes de type stigmergique semblent adéquats dans ce type de configuration. Mais les signaux produits et consommés nécessitent un espace dans lequel se manifester. Le point précédent en a donné des exemples physiques (le sol sur lequel évoluent les fourmis, la matière organique composant le cerveau) ou numérique (une interface sur écran d'ordinateur). À cette fin d'espace support dans le contexte d'une activité industrielle, le jumeau numérique présente un concept intéressant. Le jumeau numérique, de plus en plus reconnu dans le monde académique et industriel (Tao, Cheng, et al., 2018) et dont la littérature est relativement récente (Cimino et al., 2019 ; Errandonea et al., 2020), a été identifié comme une solution au manque de conscience de situation dans les systèmes complexes (Camara Dit Pinto et al., 2024). Les termes de jumeau numérique ont été introduits par Grieves dans une conférence sur la gestion des cycles de vie (Tao, Zhang, et al., 2018). Sa définition a évolué au cours du temps pour devenir : « Un produit physique dans un espace réel, un produit virtuel dans un espace virtuel et la connexion de données et d'information qui lie les deux espaces » en 2017 (Grieves & Vickers, 2017) ou encore, plus précise et satisfaisante dans le présent contexte puisqu'elle y inclut des éléments de sa constitution et sa finalité : « Un jumeau numérique se définit comme une représentation dynamique d'un système physique utilisant des données, des modèles et processus interconnectés pour permettre

l'accès à la connaissance des états passés, présents et futurs pour gérer l'action sur ce système » (Camara Dit Pinto et al., 2021).

Comme la représentation qui définit le jumeau numérique se veut dynamique, elle doit tendre vers le plus d'automatisation possible, notamment au niveau des flux de données qui le lient au jumeau physique. L'automatisation permet de fluidifier le fonctionnement et assurer la mise à jour du jumeau numérique en limitant le nombre de manipulations qu'elle nécessite. Différents niveaux d'intégration des données ont été identifiés par les auteurs de (Kritzinger et al., 2018) (Figure 3.10), illustrant cette voie d'évolution vers des flux automatisés, permettant ainsi un jumeau numérique.

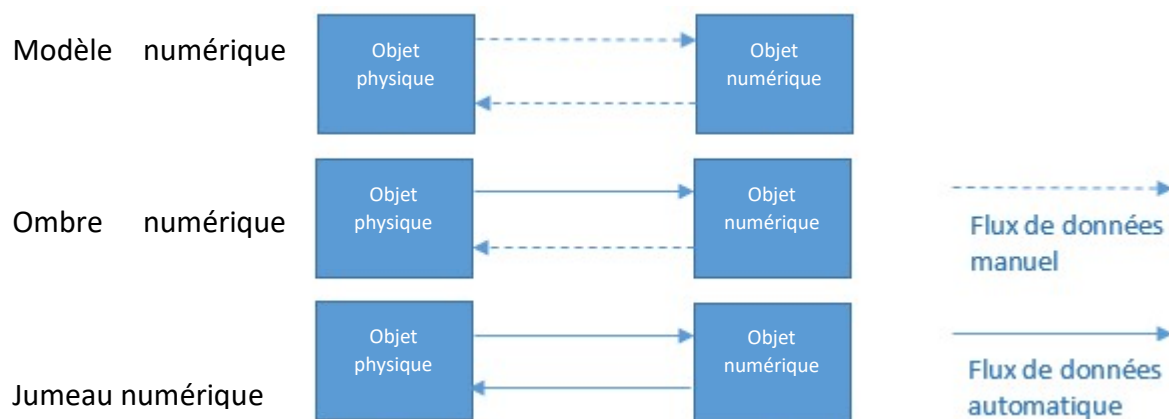


Figure 3.10 : Niveaux d'intégration des données adapté de (Kritzinger et al., 2018)

Le jumeau numérique peut donc donner un aperçu du système, du point de vue du produit en lui-même et de son cycle de vie (Grieves & Vickers, 2017). Ceci permet une supervision du produit efficace. Une modélisation de son environnement et des organisations qui l'entourent serait un apport également utile au support et à la supervision de l'activité puisque c'est dans cet espace qu'elle s'exerce et que les décisions se prennent (Tao et al., 2017). Le monde physique comporte déjà une certaine complexité. Pour éviter d'augmenter davantage cette dernière en incorporant de tels outils numériques dans ce monde physique, il est capital qu'ils reflètent fidèlement son état en temps réel ou quasiment réel (Kritzinger et al., 2018). Cette complexité implique l'appréhension holistique du système et de son environnement et nécessite une cohérence et une tenue à jour des données à disposition de tous les acteurs présents (Liu & Xu, 2017).

Si les jumeaux numériques sont habituellement centrés sur la représentation du produit ou du service proposé, dans le cas de son utilisation pour l'amélioration de la prise de décision collaborative pour la résolution de problèmes complexes, il s'agit plutôt de décaler l'application vers une représentation des acteurs de l'organisation eux-mêmes. Les travaux de (Tao, Zhang, et al., 2018) explorent l'utilisation du jumeau numérique pour modéliser non seulement des produits mais aussi des processus organisationnels, montrant comment cette approche peut améliorer la prise de décision en intégrant des flux d'informations en temps réel au sein de l'organisation.

Ainsi le jumeau numérique devient le médium nécessaire aux échanges : un espace de cognition partagée. De plus, il devient un support nécessaire pour l'apprentissage de cette organisation par l'intégration des données utiles issues de ces échanges. Cette approche est particulièrement utile dans des environnements complexes et hétérogènes, comme l'ont démontré les auteurs de (Negri et al., 2017), qui ont utilisé des jumeaux numériques pour modéliser des systèmes de production intelligents, en soulignant l'importance de la synchronisation en temps réel et des interactions entre acteurs humains et machines.

Face à une grande complexité de l'organisation et une hétérogénéité des différents agents entrant en jeu, un médium peut aider à mieux les coordonner, qu'ils soient humains ou machines. La manière dont chacun doit être connecté à l'organisation via le médium, que peut représenter un jumeau numérique de cette organisation, a tout intérêt à correspondre à une solution élégante dans le sens mathématique du terme (Poincaré, 1910). Une solution mathématique élégante signifie une solution simple et facilement compréhensible qui s'adapte au plus grand nombre de situations différentes possibles. En effet, des études comme celles de (Qi & Tao, 2018) montrent l'importance de la collecte de données massive pour les jumeaux numériques mais soulignent en même temps la limite que cela implique : les conflits et incompatibilité.

Un besoin de nettoyage et d'uniformisation des données est expliqué, sous peine de dysfonctionnement. Cela semble entrer en contradiction avec les besoins de flexibilité. L'approche modulaire peut apporter cette adaptabilité. D'autres études comme celles de (Kritzinger et al., 2018) ont souligné l'importance de maintenir la simplicité et la flexibilité des modèles pour garantir leur applicabilité dans des contextes variés. L'intégration d'un jumeau numérique avec une structure multi-agents, même si elle n'est pas explicitement nommée ainsi, est montré dans les travaux de (Leng et al., 2019) comme présentant des avantages en termes de réactivité et d'efficacité dans une chaîne de production. Ceci est permis grâce à une structure d'ateliers autonomes offrant une meilleure flexibilité globale. Cette flexibilité est induite par une gestion et prise de décision décentralisée. Si le jumeau numérique se base sur un modèle multi-agents, pour que les agents conservent leur autonomie et leur capacité d'auto-organisation, leur modèle doit se ressembler quel que soit leur fonction dans l'organisation, en suivant un principe de spécification minimale (Morgan, 1999). La définition d'une entité peut se faire plutôt en fonction de son champ d'interactions (Maturana & Varela, 1991). En effet, le médium doit être l'objet privilégié de l'étude, étant donné que les performances d'un groupe et l'intelligence collective dépend plus du processus de collaboration de groupe que des compétences des membres individuels de ce groupe (Riedl et al., 2021).

3.3.1.2 Application

Le jumeau numérique apporte un environnement interstitiel (spatial et temporel) de communication entre les agents. Cela signifie que l'environnement numérique qui y est associé et dans lequel tous les agents se côtoient, permet de lier les agents physiques qui sont séparés dans le temps ou dans l'espace. Du point de vue spatial, lorsque l'organisation est de grande taille, les agents des différents services peuvent être éloignés géographiquement et

ne pas se côtoyer dans le monde physique, ce qui rend impossible une éventuelle synergie entre eux.

Du point de vue temporel, les agents ne sont pas toujours disponibles en même temps pour collaborer sur une même tâche, à cause d'indisponibilités liées à d'autres tâches, des congés etc. Cela est d'autant plus vrai que les participants d'une collaboration sont nombreux. Le jumeau numérique peut donc leur permettre une collaboration asynchrone facilitée.

Chaque agent physique doit avoir accès à une interface vers son homologue numérique comme le montre la Figure 3.11. Les agents manquants peuvent aisément être identifiés, comme les agents médiateur ou analogiste vus précédemment qui ont donné lieu à la conception de nouveaux agents machines rendus possibles grâce au jumeau numérique. Pour rappel, la partie philosophie des sciences cognitives employées pour la modélisation (Section 3.2.1) met en garde contre la pensée dichotomique qui consiste à faire une séparation claire entre le jumeau numérique et le jumeau physique, au profit d'une pensée complexe. Mais ce diagramme fait cette séparation à des fins de simplification de représentation.

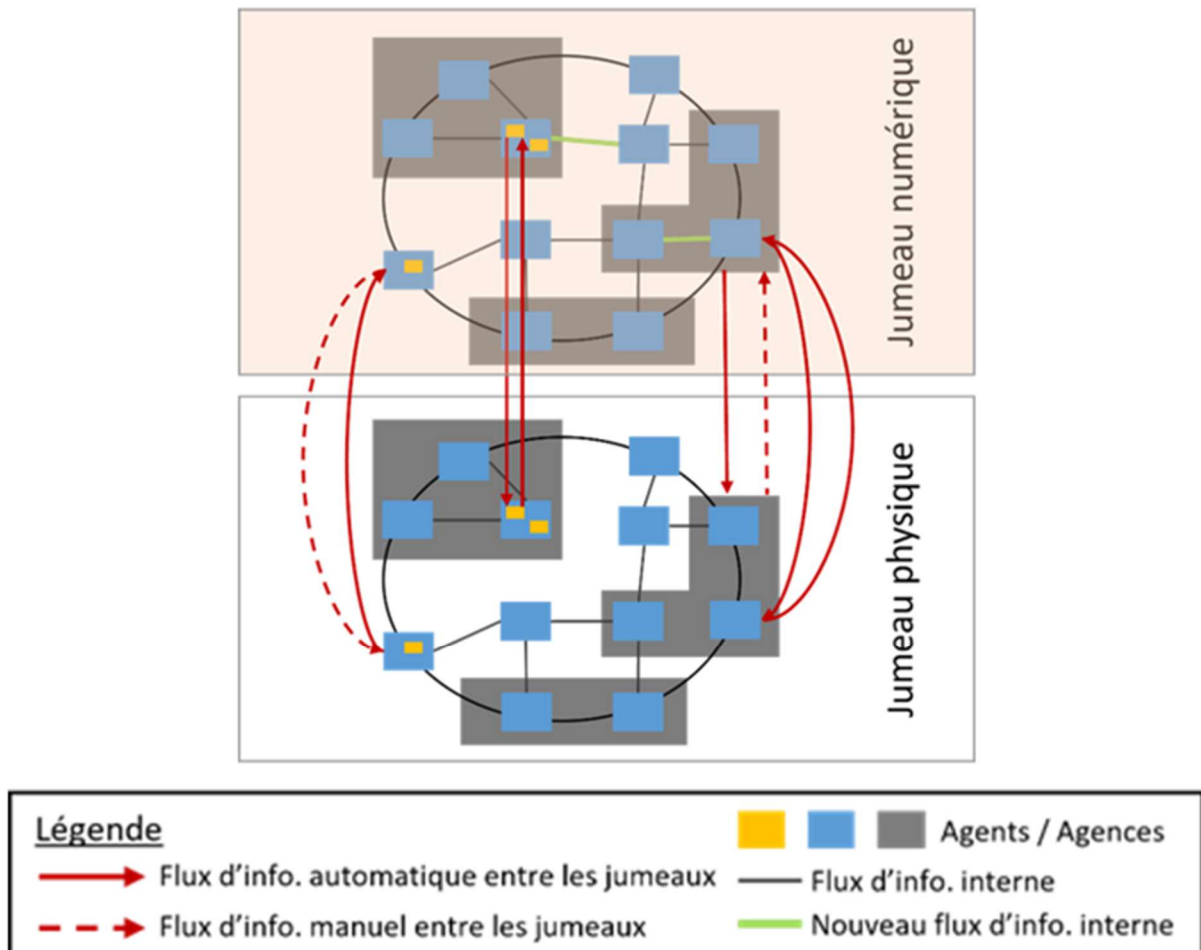


Figure 3.11 : Organisation représentée sous forme de système multi-agents et son jumeau numérique. Des communications manquantes dans le jumeau physique sont établies dans le jumeau numérique

Ce jumeau numérique a pour but de fournir à chaque agent les informations dont il a besoin sur son interface avec le jumeau numérique, ici représentée par les flux d'information. Tout

comme de nombreux moyens de communications, les informations doivent être transmises sous la bonne forme, mais aussi la bonne fréquence. Chaque capteur, naturel ou non, ne peut capter une information que dans une fourchette de fréquences pour pouvoir être interprétée. A l’instar des yeux ou des oreilles, respectivement adaptés plutôt pour des fréquences de fourchette haute (comme les couleurs) ou basses (comme les sons), les agents peuvent interpréter des indicateurs stigmergiques à des fréquences adéquates. Contrairement aux sons ou couleurs, les indicateurs stigmergiques peuvent se moduler en fréquences relatives, c’est-à-dire en fonction du nombre d’occurrences plutôt qu’en fonction du temps. La Figure 3.12 donne un exemple de série d’indicateurs stigmergiques tels qu’ils figureront sur la maquette lors des expériences. En effet, des pastilles vertes peuvent représenter les cas passés avec des retours positifs à la suite de leurs traitements si cela figure sur les différentes options possibles lors d’une décision. Les pastilles rouges représentent au contraire des échecs. Cependant, les effets de tous les cas passés ne sont pas forcément connus s’ils sont restés en boucle ouverte ou si l’évaluation n’a pas été possible, ce qui est représenté en gris. Il semble donc que la quantité de retours connus impacte le nombre minimum de pastilles nécessaires pour obtenir un indicateur exploitable correctement. Ceci sera expérimenté lors des tests utilisateurs.



Figure 3.12 : Indicateurs stigmergiques. En vert, il s’agit d’un retour positif d’une occurrence passée ; en gris, le résultat est inconnu ; en rouge, le résultat est négatif.

Il a été établi un cadre de modélisation pour faciliter la prise de décision et l’apprentissage au sein d’une organisation apprenante telle que les organisations impliquées dans la résolution de problèmes de maintenance. Comme les défis majeurs de ces prises de décisions et d’apprentissage se trouvent à un niveau non seulement individuel mais collectif, les modèles proposés sont construits pour pouvoir représenter tous les niveaux d’une telle organisation. Le système multi-agents s’appuie sur un modèle d’agence et sur un modèle d’agent pour bénéficier d’une flexibilité telle qu’il peut embrasser une organisation dont les éléments sont hétérogènes et évolutifs tant dans leurs structures et leurs fonctions que dans leurs rapports les uns avec les autres. Ce modèle se concentre sur les échanges entre ces agents, humains ou machines. Le modèle des agents en eux-mêmes est générique, structuré mais peu spécifié par souci de flexibilité et d’autonomie. La procédure de prise de décision collaborative a été structurée pour pouvoir spécifier le comportement du système multi-agents puis l’évaluation des éléments issus de la collaboration. La mise à disposition ou non des indicateurs émergeant des prises de décisions passées prend en compte les notions de motivation en groupe du domaine de la psychologie de groupe. Cette collaboration et la mise à disposition d’indicateurs stigmergiques est rendue possible par un jumeau numérique de l’organisation physique. Ce jumeau numérique, comme son pendant physique, est un environnement numérique construit à partir du système multi-agents, pour apporter des réponses à des besoins jusque-là inaccessibles dans le monde physique. Par exemple, l’agent machine analogiste peut exercer grâce au jumeau numérique. Le chapitre suivant présente l’analyse terrain à travers ce modèle, et ce que ce modèle fait ressortir sur les atouts et les points d’améliorations encore existant sur le terrain. Enfin l’instanciation du modèle en l’adaptant au terrain met en évidence

les éléments indispensables à la simulation du jumeau numérique pour qu'il soit testé en conditions réalistes.

3.4 Application du cadre de modélisation

La section précédente a permis de modéliser un jumeau numérique de l'organisation en déterminant les fonctionnalités qu'il doit contenir. Ces fonctionnalités ont pour objectif d'intégrer l'organisation physique pour l'interconnecter, la compléter et la guider dans des processus décisionnels qui la rendent apprenante. Cette section dédiée à l'instanciation a pour but de démontrer l'applicabilité des modèles sur l'organisation réelle.

Comme l'a montré la Figure 1.2, les processus décisionnels de maintenance font intervenir plusieurs rôles, en interaction plus ou moins directe avec le client en vue de maintenir le moteur d'hélicoptère. Un 'Field Representative', au contact direct du client, peut-être contacté directement par le client lui-même dans le cadre du signalement d'un problème moteur, ou pour poser une question. En cas d'incapacité à répondre à une sollicitation à lui seul, ce 'FR' peut se tourner à son tour vers un 'Service Engineer' aux compétences techniques plus avancées, qui lui-même peut se tourner vers un autre spécialiste de l'organisation si besoin. Ainsi, la sollicitation d'un client peut pénétrer plus ou moins profondément dans l'organisation selon sa complexité et selon la pluridisciplinarité que la réponse nécessite.

Des rôles fréquemment impliqués dans les prises de décisions ont pu être identifiés lors de vingt-et-un entretiens semi-structurés de quinze collaborateurs du département Service et Support, qui se répartissent sur neuf services, tous impliqués dans les processus de réparation et de maintenance.

Le cadre d'étude s'est concentré sur trois rôles principaux : les 'Field Representatives', les 'Service Engineers' et les ingénieurs du 'Health Monitoring'. Les entretiens en groupe, dont la taille variait entre un binôme de personnes interrogées et un service entier d'une dizaine de personnes, ont été suivis d'entretiens individuels qui se sont avérés complémentaires et plus fructueux vis-à-vis de la quantité d'information recueillie. Ceci est permis par une meilleure liberté de parole éprouvée par l'interviewé pour détailler les fonctionnements officieux et non seulement officiels, usuellement évoqués en gestion de connaissance sous le nom d'activité, par opposition à la tâche prescrite. Ces entretiens, associés à l'observations et l'analyse de l'activité, ainsi que des outils et de la documentation générés par cette activité, ont permis de préciser l'existant, et comment un jumeau numérique de l'organisation peut s'inscrire dans les processus décisionnels. La confrontation du modèle au terrain et l'étude de ce dernier permettent de préciser les éléments nécessaires à l'implémentation du prototype pour qu'il s'inscrive dans la culture d'organisation et reprenne ses codes. C'est ce qui est présenté dans les parties suivantes.

3.4.1 Description et analyse initiale de l'organisation étudiée

3.4.1.1 Description générale de l'organisation

L'étude du terrain a révélé que la complexité inhérente à cette activité provient non seulement du produit en lui-même, le moteur d'hélicoptère, mais également dans une large mesure du système sociotechnique dans son ensemble.

Les techniques évoluant au gré des avancées technologiques, de nouveau flux d'informations contribuent à accroître la complexité de l'organisation. Par exemple, entre les vols, la collecte de données transférées directement depuis un dispositif placé sur la machine pour un traitement du service 'Health Monitoring' et une interprétation par le 'Service Engineering', outrepassent désormais le parcours linéaire traditionnel. En effet, au lieu de suivre le parcours linéaire qui débute de l'extérieur de l'entreprise (Client) vers l'intérieur ('FR' puis 'SE' puis spécialistes comme le 'HM'), le processus débute directement au cœur de l'organisation avec le 'HM'.

Dans la partie bibliographique traitant des sciences cognitives (Section 2.2), trois courants de pensées avaient été abordés : le cognitivisme, le connexionnisme, et la modularité cognitive. Le cognitivisme a l'avantage d'être généraliste mais le désavantage d'être rigide et vulnérable au moindre changement. Les réseaux du connexionnisme résolvent ce problème de rigidité par sa flexibilité, mais sont trop spécialisés dans une tâche. Le juste milieu, comportant les avantages de ces deux derniers et réglant leurs limites, se trouve dans la modularité.

Des manifestations issues de ces trois courants se retrouvent dans l'organisation :

- Bases de données et de connaissances isolées : des bases de connaissances existent. Cependant, tout comme les services de l'organisation qui se sont historiquement développés en silos cloisonnés, les bases de connaissances sont isolées. Par exemple, une base de connaissance d'un service dédié à la sûreté qui répertorie les incidents passés et leurs causes, serait de toute évidence utile à un grand nombre d'autres services comme le 'Service Engineering' pour affiner leur connaissance de l'usure des moteurs ou le 'Health Monitoring' dans l'orientation de la détection de certaines dérives spécifiques. Mais ce genre de base de connaissance est sous exploité à cause de sa multiplicité et de son caractère décentralisé. De plus, l'information au sein même d'une base a tendance à s'accumuler selon un empilement, plutôt que s'intégrer, c'est-à-dire mettre à jour la connaissance de manière synthétique. Cette quantité informationnelle cumulée peut tout simplement avoir un effet dissuasif pour les non spécialistes ou les acteurs d'une activité connexe. Ce manque d'intégration interne à la base se répercute sur son intégration externe, c'est-à-dire qu'elle ne s'inscrit pas de manière systématique dans les processus d'apprentissage et de décision de l'organisation. Le caractère inutilisable du produit de ces phénomènes d'empilement et la nécessité de substituer cela par une intégration dès la conception a été constaté dans de nombreux secteurs, tels que le nucléaire (Boy & Schmitt, 2013). Ceci fait écho au cognitivisme ;
- Traitement de données par des techniques d'intelligence artificielle : des solutions utilisant l'intelligence artificielle sont déployées pour assurer des tâches de bas niveau dans le modèle de Rasmussen évoqué dans la partie 3.1.4 : le niveau des compétences. Cela concerne des tâches massives quantitativement comme la détection automatique

de tendances anormales (températures, vitesses, altitudes...) à l'aide d'apprentissage machine, ou encore la classification de commentaires de clients dans des rapports par le traitement automatique du langage naturel à l'aide de réseaux de neurones artificiels. À maturité, ces dispositifs sont très efficaces mais spécialisés et devraient être intégrés à un système les mettant en relation et pour alimenter des processus plus complexes et généralistes, incluant les connaissances par exemple. Ceci fait écho au connexionnisme ;

- Besoin d'un mécanisme d'apprentissage basé sur l'expérience : si des tâches cognitives sont attribuées à des machines comme une base de connaissance pour la mémoire ou l'apprentissage machine pour la perception, elles peuvent constituer des modules mais ne sont pas liées par une trame commune. Au même titre que les collaborateurs humains, les processus décisionnels auxquels elles participent ne s'inscrivent pas dans une matrice générale de l'organisation permettant de collecter les données générées par ces décisions. Par exemple, le 'Health Monitoring', dans son développement d'une surveillance automatisée des données, fixe manuellement des seuils d'alertes à l'aide de leur expérience personnelle et de discussions avec le 'Service Engineering'. Il n'existe pas de système général de réajustements de ce genre d'outils basés sur l'expérience, tout comme il n'existe pas de système liant qui les intègre systématiquement dans les processus décisionnels. Ceci fait écho à la modularité cognitive.

Ces outils observés (intelligence artificielle, bases de connaissances ...) ainsi que les collaborateurs humains qui les utilisent et communiquent entre eux, présentent autant de systèmes qui sont les modules d'un système de systèmes. Ce système de systèmes déjà existant est interconnecté par différents moyens de communications, qui vont du transfert de données automatisé à la conversation officieuse et spontanée en face à face, en passant par des échanges d'e-mails, réunions présentiels ou distancielles, rapports et outils consultables.

Lorsque les conditions rendent les réunions en présentiel plus rares ou impossibles, comme le confinement de la période de pandémie de covid-19, le maintien de la bonne entente générale entre collaborateurs s'est avéré plus délicat, avec une émergence de conflits plus fréquents. Ceci peut être dû à une réduction de la qualité de la communication puisque les réunions présentiels ont été remplacées par des réunions en ligne avec son et caméra, voire souvent sans caméra, et les discussions non formelles ont quasiment disparu. La majeure partie de la communication entre les personnes est en réalité non verbale, avec 7% par les mots, 38% par la voix (ton et intonation) et 55% par le langage corporel (expressions faciales et gestes) (Mehrabian, 1981). Les réunions en distanciel rendent en elles-mêmes les interactions plus rares, mais se font également souvent sans caméra, ce qui supprime le langage corporel qui représente plus de la moitié de ce qui constitue la communication. Les communications moins denses, entre les réunions, qui s'effectuent par e-mail, suppriment également la partie de la voix, ce qui appauvrit considérablement la communication et peut donner lieu à des interprétations faussées, des incompréhensions et mésententes. Cette baisse de fréquence et de nuance dans les communications semble donc rendre la collaboration plus difficile. Ceci confirme l'importance de la fréquence des communications et de la compréhension mutuelle, notamment au niveau des émotions et intentions des autres, évoquée précédemment pour

une bonne collaboration. Ce constat rend pertinent la mise en place d'un outil de support d'échanges collaboratifs plus fréquents, systématisant l'élicitation des raisons des décisions d'autrui, la consultation de l'avis d'autrui afin d'éviter les suppositions biaisées, ainsi qu'une manière de nuancer les propos et la considération par chacun des participants des options possibles. Des évaluations en aval de chacun peuvent également apporter un droit de réponse, y compris pour ceux qui n'ont pas la main sur la décision finale. Un processus permettant non seulement de présenter les options possibles et les préférences de chacun mais également les ressentis vis-à-vis de chaque choix permettrait d'atténuer les émotions négatives. En effet, exprimer des émotions négatives permet de les atténuer (Lieberman et al., 2007). Ainsi, l'atmosphère collaborative peut être détendue par l'expression d'une peur ou d'une hostilité associée à une option possible par exemple.

D'après les observations, l'attention des différents métiers est concentrée principalement sur le suivi des moteurs d'hélicoptères, leur santé et le relationnel avec les clients. Les problématiques d'échanges internes à l'organisation ne font pas l'objet d'études et de démarches d'améliorations aussi poussées en dehors de la présente étude. Dans le Chapitre 2, il a été avancé qu'une étude implique l'objet étudié et l'observateur qui l'étudie, et que ce dernier a tendance à être négligé. Dans cette thèse, l'observation et les mécanismes de compréhension sont pris en compte, par exemple avec la métaphore. Cette idée de prise en compte de l'observateur et son processus de compréhension est à transposer au sein de l'objet d'étude lui-même : l'organisation. Les agents de cette organisation, humains ou machines, se concentrent sur le produit (moteur), ce qui laisse un manque dans l'observation et la coordination de l'organisation qui surveille ces moteurs.

Par exemple, dans le cadre des observations effectuées au sein de l'entreprise Safran Helicopter Engines, un collaborateur a été amené à rechercher un expert pouvant traiter une problématique technique précise. Étant donnée la taille de l'entreprise et l'hétérogénéité des expertises, ce collaborateur n'avait aucun moyen rapide de savoir si une personne avait la compétence adéquate, ni de localiser cet éventuel expert. Cette recherche s'est étendue sur trois jours, illustrant les difficultés à gérer et visualiser les savoirs, qu'ils soient tacites ou explicites, dans les grandes organisations. Cet exemple souligne l'importance de dispositifs efficaces d'intégration des compétences, de partage des savoirs et d'identification des expertises, permettant ainsi de réduire les délais de résolution des problèmes.

3.4.1.2 Caractéristiques de l'organisation

Les observations menées au sein de Safran Helicopter Engines (SHE) montrent une organisation dotée d'outils numériques avancés, comme la surveillance moteur ('HM') et les systèmes d'alerte automatique, qui permettent d'anticiper des dérives invisibles pour les clients. Ces dispositifs transforment les pratiques, mais leur usage reste cloisonné, faute d'intégration transversale.

La collaboration entre métiers repose sur des interdépendances fortes, mais la circulation des savoirs reste largement informelle. Ainsi, lors d'une problématique technique, un collaborateur a mis trois jours à identifier un expert compétent, illustrant la dépendance aux réseaux personnels et le manque de dispositifs outillés pour cartographier rapidement les compétences.

Les communications informelles — discussions de couloir, échanges d'e-mails — favorisent la diffusion locale des connaissances, mais celles-ci ne sont ni conservées ni accessibles à l'ensemble de l'organisation. Les plateformes existantes (comme « cockpit », l'une d'entre elles recensant des cas de maintenance passés) se limitent à l'archivage et n'alimentent pas directement les décisions quotidiennes, ce qui entraîne une perte d'expérience en cas d'absence ou de départ d'un collaborateur.

Enfin, le langage partagé, mêlant vocabulaire technique et métaphores médicales (« diagnostic », « fatigue », « opération »), facilite la communication entre experts mais impose aux outils numériques de l'intégrer pour être utilisables.

En somme, malgré des compétences pointues et des moyens techniques solides, l'organisation reste freinée par une circulation fragmentée de l'information et l'absence de mécanismes transversaux permettant de relier rapidement les acteurs et de valoriser pleinement l'expérience accumulée.

L'observation de l'organisation SHE peut également être lue à travers la triade agent – agence – processus de décision. L'agent correspond ici aux différents acteurs impliqués dans la maintenance (ingénieurs 'SE', 'HM', 'FR'), porteurs chacun de compétences spécifiques. L'agence désigne leur service d'appartenance respectif, qui se déploie dans un cadre organisationnel marqué par des interdépendances fortes mais aussi par des contraintes de cloisonnement. Enfin, le processus de décision apparaît comme le résultat d'une articulation entre initiatives individuelles, coordination interservices et arbitrages collectifs, souvent freinée par des délais liés à l'identification des experts ou à la dispersion de l'information.

3.4.1.3 Limites et besoins

L'analyse met en évidence plusieurs limites structurelles :

- Une fragmentation de l'information due au cloisonnement des services et à la dépendance aux réseaux informels ;
- Une perte d'efficacité liée à la difficulté d'identifier rapidement les bonnes expertises, entraînant des délais significatifs ;
- Une exploitation partielle des outils existants, dont la logique d'archivage ne favorise pas la réintégration dynamique des retours d'expérience ;
- Des tensions accrues en contexte de télétravail, où la disparition des échanges informels renforce les silos et ralentit la circulation des savoirs.

Ces constats soulignent un besoin clair : développer des dispositifs favorisant la mise en relation rapide des acteurs, la valorisation continue des connaissances accumulées et la constitution d'une conscience collective élargie, afin de soutenir la réactivité et la qualité des décisions au sein de l'organisation.

En reprenant le parallèle avec le cerveau, les collaborateurs, ou agents humains ou machines identifiés dans l'organisation, peuvent s'apparenter aux neurones. Les collaborations, ou échanges collaboratifs, qui existent sous formes variées, peuvent s'apparenter aux synapses. Il manque seulement, dans l'entreprise, le comparatif avec la mise en réseau cérébral macro, c'est-à-dire à l'échelle du cerveau entier, comme c'est le cas pour les pensées conscientes. En effet, dans l'entreprise, les collaborations interindividuelles en petits réseaux de collaborateurs proches géographiquement s'apparentent aux échanges synaptiques entre les neurones contigus. Cependant, il manque un mécanisme de sollicitation de collaborateurs éloignés géographiquement mais dont les fonctions sont complémentaires dans des contextes donnés, dont le nombre peut établir un réseau à l'échelle macro de l'entreprise, à l'instar du système d'ondes de calcium des cellules gliales qui lient des neurones non voisins.

3.4.2 Modélisation de l'organisation étudiée

3.4.2.1 Modélisation des processus

Les nombreux entretiens précédents ont permis d'orienter les entretiens et analyses suivants pour étudier plusieurs cas réels correspondant à des résolutions de problèmes vécues par l'organisation. L'exploration de rapports et d'e-mails associée à neuf entretiens d'experts au sein de trois services, souvent en relation pour la résolution de cas de maintenance, a permis de déterminer un cadre pour établir les scénarios réalistes et la population participant aux expériences.

La Figure 3.13 présente l'aspect d'un exemple de cas d'étude basé sur un rapport rédigé par un FR qui a pu donner lieu à une caractérisation d'échanges et repérage des besoins et moyens employés lors du traitement de ce cas.

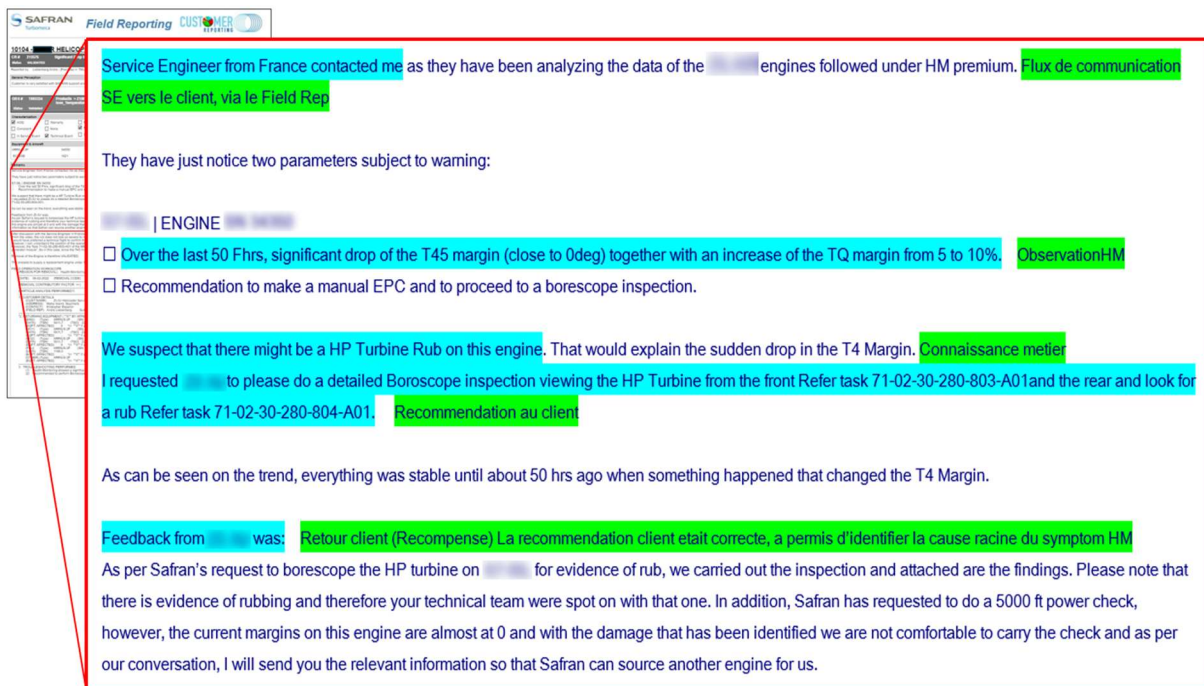


Figure 3.13 : Exemples d'apparence de document exploité dans l'analyse d'activité.

Le texte grossi ici est un extrait du rapport, sur lequel a été ajouté en vert la caractérisation de chaque échange, observation ou action précédemment identifié en bleu et les ressources qu'il demande.

En l'occurrence, dans cet extrait :

- « Un Service Engineer de France m'a contacté » → Flux de communication du SE vers le FR vers le Client ;
- « Sur les 50 dernières heures, une chute significative de la marge T45 (proche de 0 degré) associé à une augmentation de la marge TQ de 5 à 10% » → Observation HM ;
- « Nous suspectons une touche de la turbine haute pression sur ce moteur » → Connaissance métier ;
- « J'ai demandé une inspection endoscopique visuelle détaillée par l'avant de la turbine haute pression et la recherche d'une touche » → Recommandation au client ;
- « Le retour était » → Retour client (récompense) : la recommandation client était correcte et a permis d'identifier la cause racine du symptôme HM.

Ces analyses ont permis d'établir des diagrammes de processus (*Business Process Model and Notation, BPMN*)¹ afin de rendre compte de l'ampleur des échanges d'information lors d'un problème rencontré. L'exemple sélectionné pour cette explication est typique, et illustre les nouveaux flux évoqués précédemment issus de la réception directe de données depuis des dispositifs installés sur l'hélicoptère. Il représente la réception et l'exploitation de ces données par le HM qui met en évidence une anomalie. Cette anomalie constatée par le SE donne lieu à une série d'échanges, de consultations et d'opérations de maintenance qui débouchent sur la dépose du moteur, c'est-à-dire son extraction pour un remplacement. Sur la Figure 3.14,

¹ Pour une présentation du standard BPMN et des symboles utilisés, voir : <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/> ou une explication simplifiée sur Lucidchart : <https://www.lucidchart.com/pages/fr/que-signifie-bpmn>

l'organisation côté client (utilisateur de l'hélicoptère et bénéficiaire des services de maintenance) qui prend part à cette collaboration se trouve dans la partie supérieure du diagramme, et le côté SHE, organisation exerçant le service de support pour la maintenance, dans la partie inférieure. La qualification d'agent pour le moteur et la documentation mise à disposition du client peut être discutable et ils pourraient être considérés comme simples objets. Mais la différence ne réside que dans la différence de degré d'autonomie, les objets pouvant être considérés comme des agents incomplets, ou insuffisamment autonomes. Or, on observe une autonomie grandissante. Dans ce cas de figure, la prévention d'un problème à venir critique commence par l'envoi des données par le moteur. Le processus traditionnel de maintenance présenté précédemment dans un diagramme évoluant de gauche à droite, du client vers l'organisation, devrait être représenté de haut en bas. Néanmoins, il ressort que ce flux direct du moteur au HM inverse la tendance, et que la résolution du cas est initiée en interne avant même que l'organisation de maintenance soit sollicitée par le client. En plus de ne pas progresser systématiquement dans le même sens, cette représentation montre que les échanges de la collaboration peuvent emprunter des voies complexes et multiples.

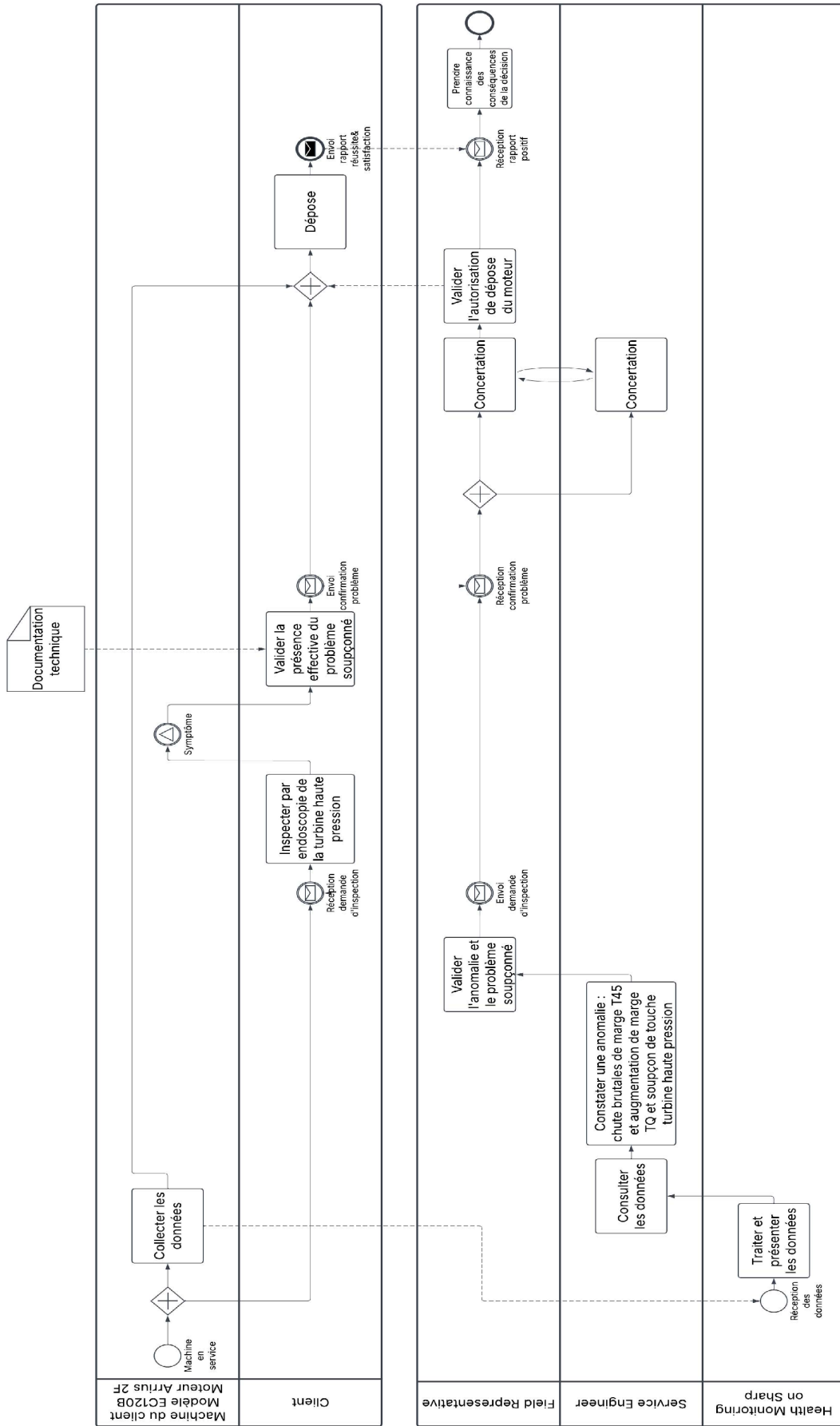


Figure 3.14 : Diagramme BPMN d'un processus de maintenance et de décision collaborative.

Le parcours de chaque agent tout au long du processus de prise de décision collaborative est détaillé dans un diagramme indépendant de processus de service (*service blueprint*). La classification des types de flux de données peut être effectuée comme sur la Figure 3.15 qui reprend le code couleur de la Figure 3.5 présentant les trois types de flux nécessaires à l'apprentissage par renforcement. Cela souligne la présence des trois types de flux pour l'agent FR qui est au plus proche du problème à résoudre, représenté par le client et utilisateur du moteur d'hélicoptère. Le type de certains flux peut être ambigu, comme ici le troisième flux de « réception de confirmation » qui correspond à la fois à une observation et à une récompense. L'analyse se concentre sur le FR, le SE et le HM qui sont internes à l'organisation. En effet, cette analyse a pour objectif de mener au prototypage du jumeau numérique de l'organisation comme système d'aide à la décision collaborative. Étant donnée la nature de l'activité et les implications de sécurité des données, il convient de simplifier l'expérimentation d'un tel système en la restreignant à un cadre interne. Ce diagramme souligne le caractère hétérogène et non intégré des médiums empruntés par les flux, ce qui peut poser des difficultés, voir une impossibilité de les exploiter en aval. Par exemple, un échange oral en face à face ne laisse aucune trace physique. De même que les formes que prennent ces échanges à la surface sont variées, les processus sous-jacents qui les supportent le sont également.

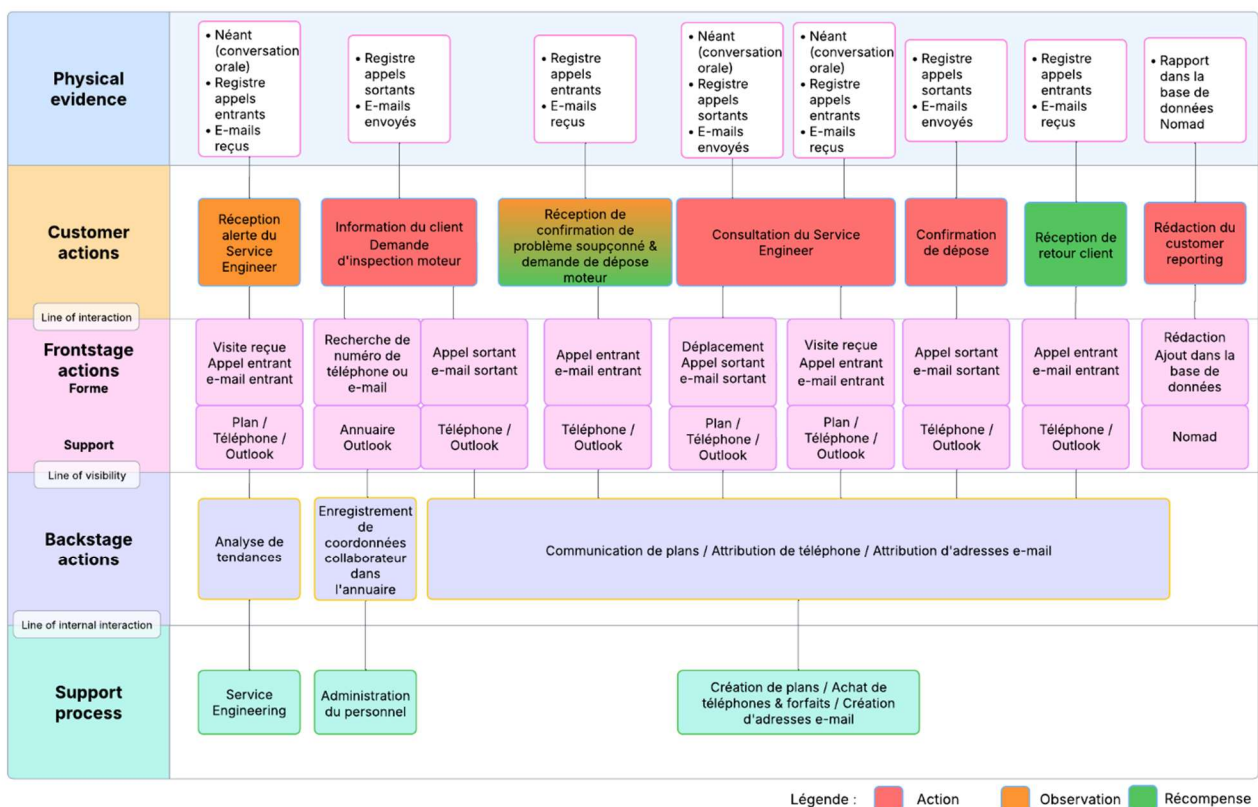


Figure 3.15 : Service blueprint du processus collaboratif du point de vue du FR.

La Figure 3.16 représentant le parcours du SE (pour le même exemple) présente une diminution du nombre d'interactions, donc d'information et de détails d'expérience vécue. Il est pourtant à l'origine de l'initiative. Le nombre de tous les types d'interaction est diminué, et les récompenses, qui peuvent pourtant être incitatives, ne font pas exception.

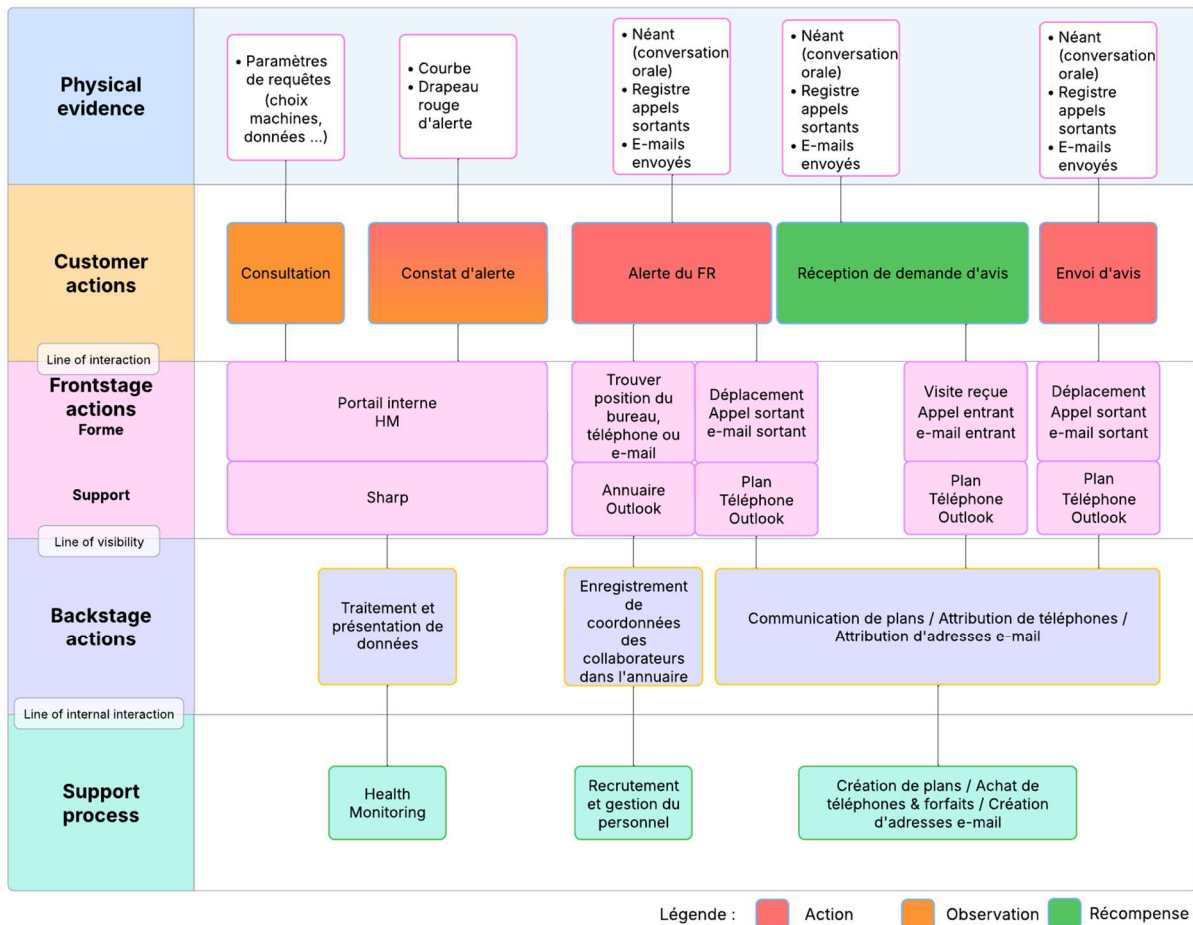


Figure 3.16 : Service blueprint du processus collaboratif du point de vue du SE.

La Figure 3.17 représentant le parcours du HM souligne les lacunes de manière plus évidente encore. Dans ce cas, les interactions sont très limitées, et les récompenses en particulier, sont inexistantes. C'est pourtant le fruit de son travail qui est à l'origine d'un cas de prévention de problème critique réussi, avec un client satisfait. Si ce service ne prend pas l'initiative de se renseigner auprès des autres sur les événements passés, ou si ces derniers ne l'informent pas d'eux-mêmes, alors il ne reçoit aucun retour sur son action, ce qui rend impossible à la fois sa motivation et son apprentissage continu.

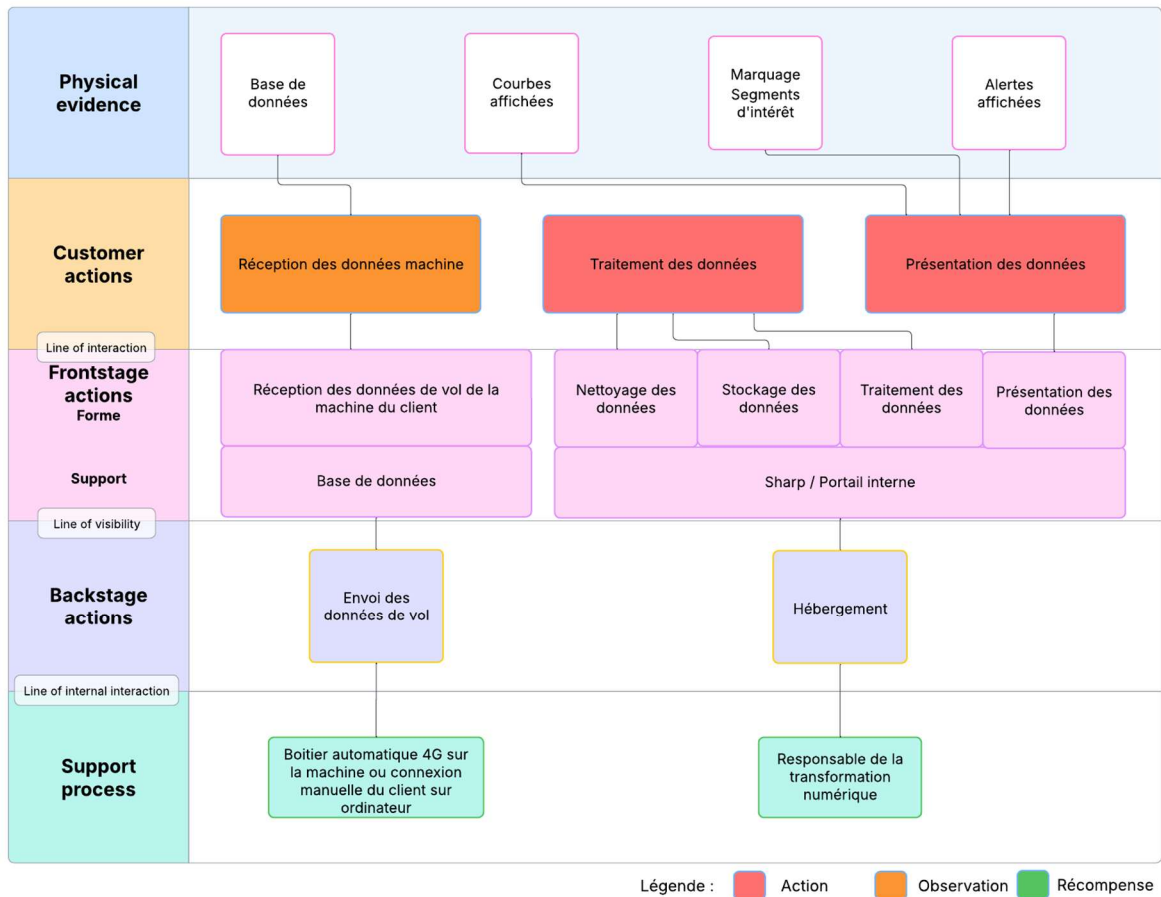


Figure 3.17 : Service blueprint du processus collaboratif du point de vue du HM.

Il y a donc une perte d'information à chaque pas d'éloignement d'un agent par rapport au problème en question, en l'occurrence le problème moteur, dans le réseau multi-agents.

3.4.2.2 Implémentation du modèle d'agence

La perte d'information est mise en évidence par la Figure 3.18 qui présente cette perte à mesure que l'agent s'éloigne du problème ici représenté par le client. Le HM n'obtient aucune récompense malgré son traitement de données fructueux et manque donc de vision sur la portée de ses actions et de possibilité d'apprendre efficacement. Cette dynamique montre que l'expérience engrangée et l'apprentissage qui en découle sont inégaux au sein des différents agents, selon le type de problème rencontré et sa position dans le réseau. Ce réseau spécifique à la résolution de ce problème forme l'agence de résolution de problème.

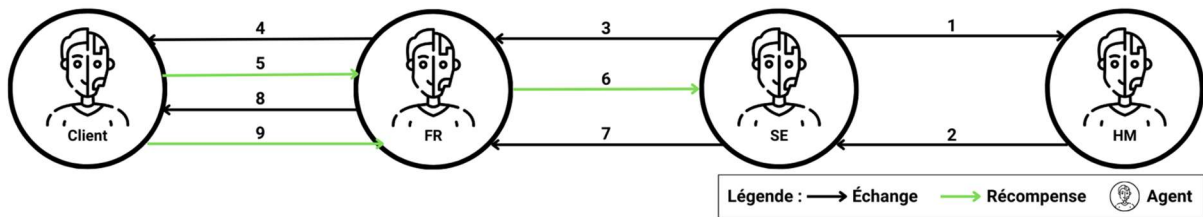


Figure 3.18 : Raréfaction de l'information, en particulier des récompenses, avec la distance dans le réseau multi-agents.

Habituellement, le processus décisionnel associé à la maintenance est modélisé comme étant un processus dont les étapes parcourent une boucle simple comme dans la Figure 3.19. Cette boucle décisionnelle pour la résolution de problème, en trois phases de requête – réponse – évaluation, peut être rapportée à un agent, avec ses équivalents comme ses perceptions en tant que dispositif de détection ou sa connaissance, son savoir-faire et ses actions en tant que contre-mesures. Cet agent, humain ou machine, peut évaluer directement le résultat de ses actions sur son environnement et ainsi acquérir de l'expérience.

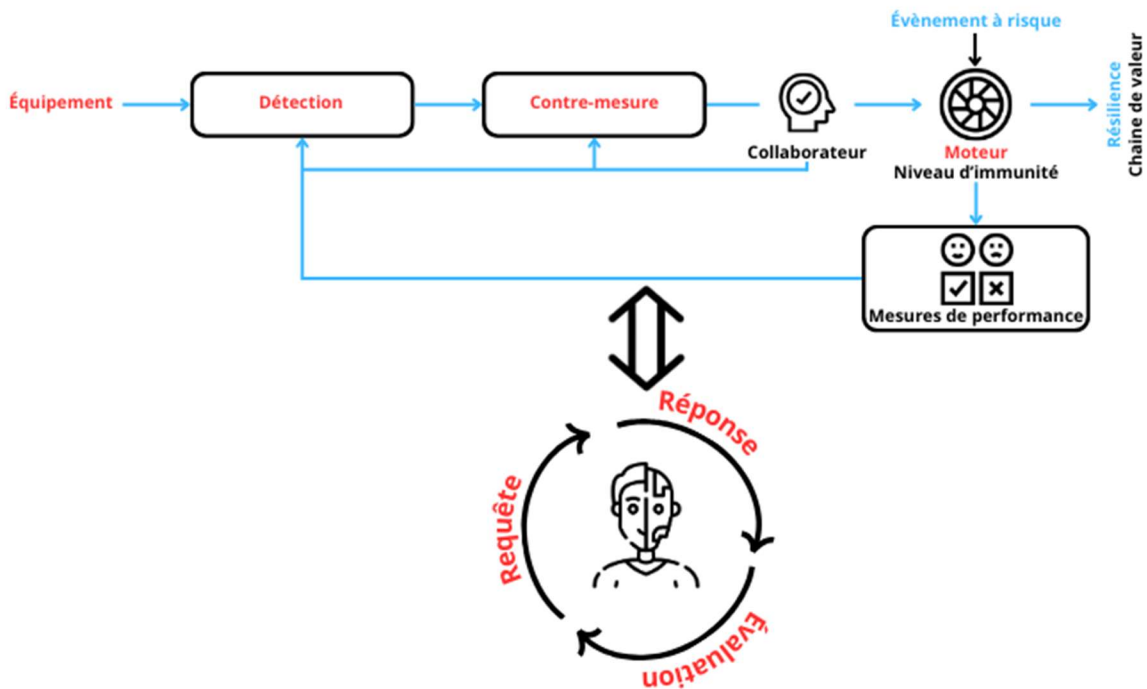


Figure 3.19 : Boucle simple de maintenance adaptée de (Cortés-Leal et al., 2022), rapportée à la résolution de problème d'un agent adaptée des étapes décisionnelles de la Section 3.2.4.

Cependant, comme le représente la Figure 3.20, la réalité du terrain présente un support plus complexe pour soutenir le processus de maintenance. En effet, les techniques de détection et de contre-mesure s'additionnent, ainsi que le nombre d'experts développant et utilisant ces techniques. Il y a présence d'un réseau qui, rapporté à la boucle en trois phases, correspond à une boucle distribuée sur plusieurs agents.

Plusieurs agents réunissent la connaissance nécessaire pour chaque étape d'une même boucle, voire au sein d'une même étape de la boucle. Un substrat, ou environnement dédié

et assurant la continuité du processus et l'intégrité de son support peut donc favoriser son bon déroulement et éviter les ruptures ou incohérences.

En résumé, comme plusieurs agents humains ou machines se complètent pour entre les étapes ou au sein même d'une étape de la boucle, cela fait naître une nécessité d'harmonisation de ces agents. De plus, l'apprentissage étant un processus itératif, il implique plusieurs boucles. Par conséquent, tout comme le processus peut se dérouler à travers différents agents d'une étape à l'autre dans la boucle, les agents supports peuvent également changer d'une boucle à suivante.

Une boucle représentant un processus linéaire d'une dimension, par définition refermé sur lui-même, est en elle-même une simplification. La réalité du processus sur le terrain peut présenter plusieurs bifurcations du processus, des boucles de différents niveaux d'aboutissement (ouvertes ou fermées), temporalités et longueurs, se séparant ou se joignant les unes les autres en un réseau de processus complexes.

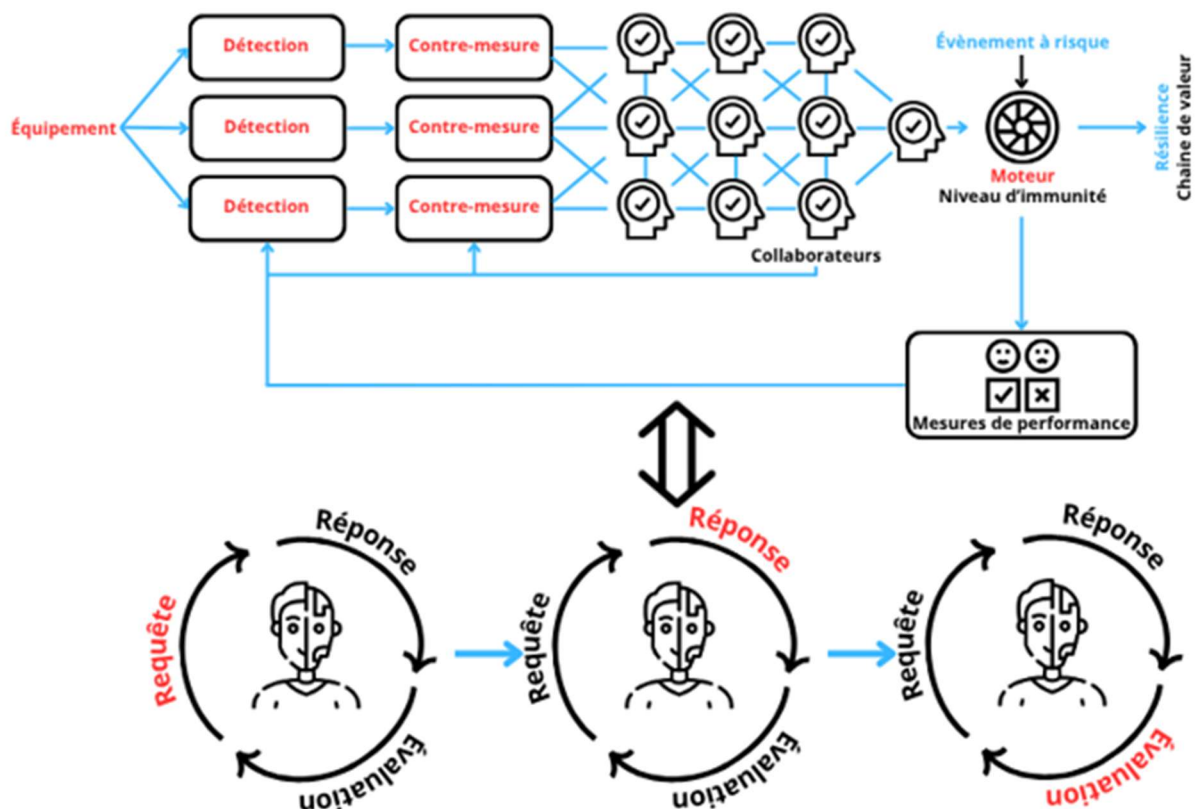


Figure 3.20 : : Boucle complexe de maintenance en réseau rapportée à la résolution de problème collaborative multi-agents.

Cet état de fait engendre un besoin de milieu numérique persistant dans lequel les collaborations peuvent laisser des traces afin d'intégrer les parties de ces processus distribués. La partie suivante détaille la manière dont un tel médium peut transformer la structure des processus de collaboration, contribuer à mieux intégrer chacune des parties et établir des conditions nécessaires à l'apprentissage organisationnel.

3.4.3 Améliorations envisagées

3.4.3.1 Extension du SMA

Pour apporter une solution de support plus holistique répondant à ce besoin de coordination visant à faire émerger des dynamiques collectives, plusieurs aspects doivent être pris en considération. La barrière de l'acceptabilité doit être considérée en premier lieu pour qu'un espace collaboratif puisse être mis en place, et ainsi :

- Favoriser et clarifier les prises de décisions,
- Garder ces interactions dans une mémoire collective augmentée,
- Et l'exploiter afin d'ajuster un guidage lors de cette collaboration.

Pour cela, des aspects généraux comme l'acceptabilité sociale doivent être considérés grâce à la présente étude du besoin et la prise en compte des pratiques en cours, mais également des aspects plus précis qui devront être testés expérimentalement dans le cadre de cette recherche appliquée et qui composent notamment la partie utilisabilité comme le décompose la Figure 3.21 : la facilité à apprendre, l'efficacité, la mémorisation, la prévention des erreurs et le sentiment de satisfaction.

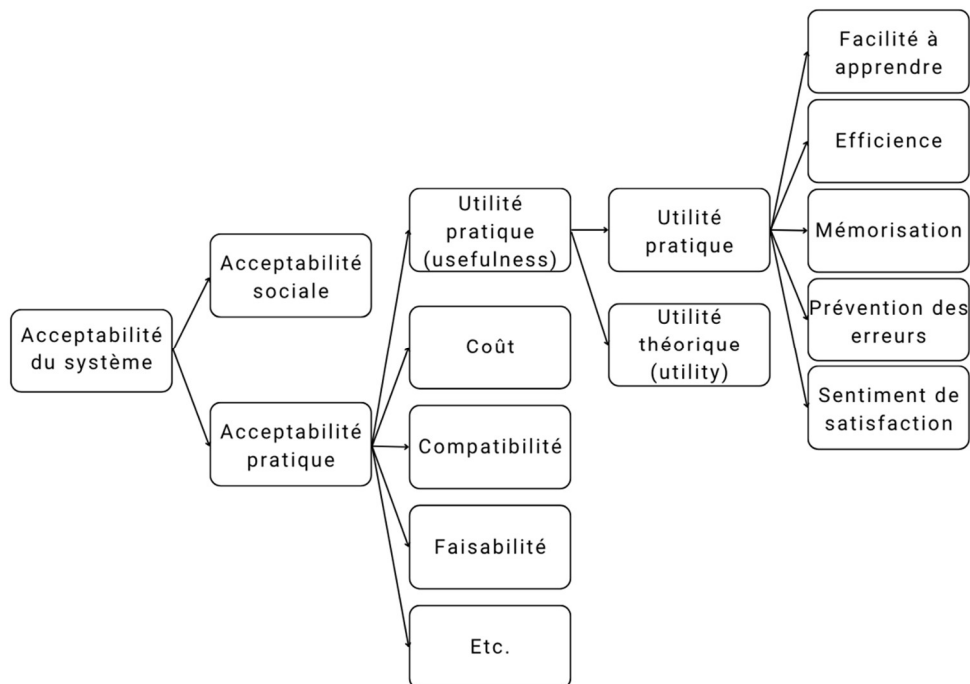


Figure 3.21 : La situation du concept d'utilisabilité dans celui d'acceptabilité, selon (NIELSEN, 1993).

Le diagramme de séquence UML de la Figure 3.22 présente les échanges qui ont eu lieu dans l'exemple de cas détaillé jusqu'ici, de manière plus épurée. Comme le cadre d'étude et d'expérimentation se veut restreint à un périmètre interne à l'entreprise, le FR qui est l'interface entre l'organisation et le client suffit à représenter les informations générées par les échanges avec l'extérieur. Ceci représente la situation telle qu'elle s'est déroulée (« AS IS ») et va pouvoir être comparée avec le processus collaboratif tel qu'il se déroulerait en présence du jumeau numérique (« TO BE »). Les rectangles représentent les lignes de vie de chaque agent au cours du processus dont le déroulement est représenté de haut en bas.

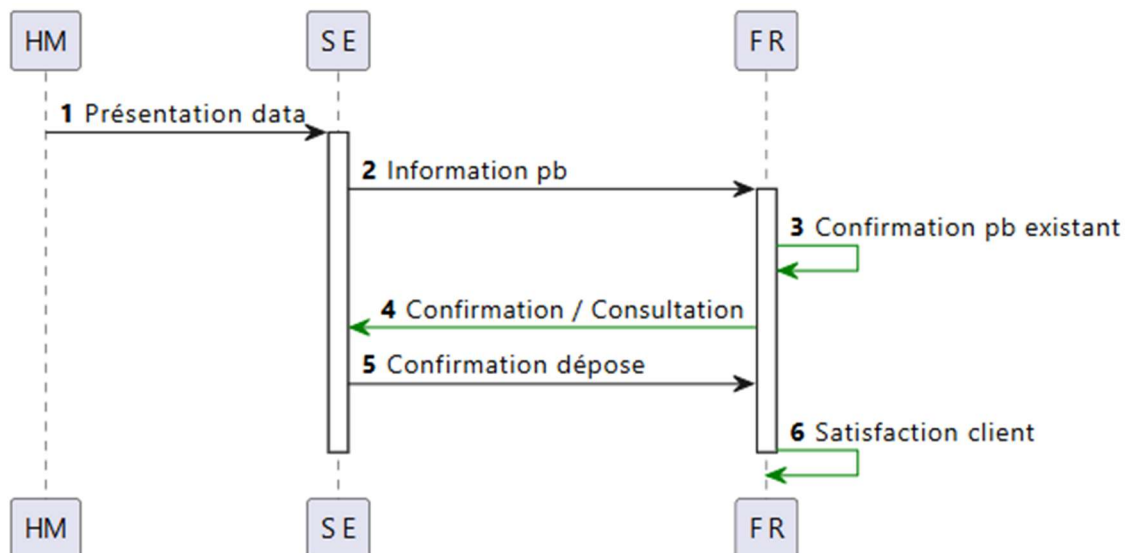


Figure 3.22 : Diagramme UML de la collaboration « AS IS » entre HM, SE et FR.

Pour conserver des traces de toutes les collaborations décentralisées afin de les traiter et les intégrer dans les futurs indicateurs et recommandations, elles peuvent être, paradoxalement, centralisées autour d'une interface médiatrice gérée par un agent. Un agent médiateur permet de mettre en relation les agents pertinents dans un contexte collaboratif donné. Un agent analogiste, qu'il s'agisse du même ou d'un agent tiers, permet de détecter des similitudes entre les caractéristiques de cette collaboration (type de problème, rôle participants ...) et celles de collaborations passées. Ceci permet d'améliorer les suggestions de caractérisation du problème ou de sollicitations d'agents tiers. La Figure 3.23 montre comment ce type d'agent simplifie la structure des échanges, malgré l'augmentation de leur nombre. En effet, chaque agent collaborateur n'échange qu'avec l'agent médiateur central qui, lui, peut se spécialiser et s'améliorer dans la mise en relation et les suggestions pertinentes.

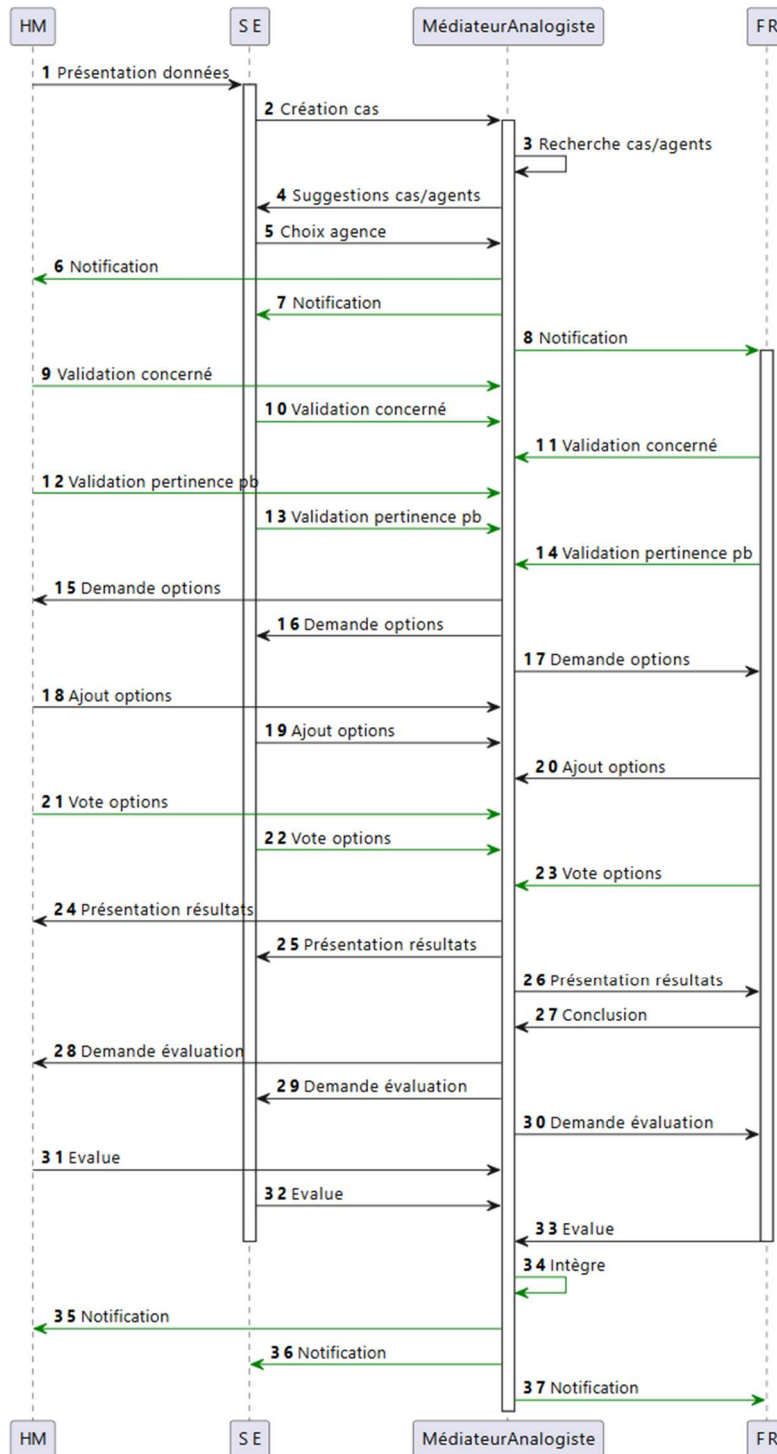


Figure 3.23 : Diagramme de la collaboration "TO BE" entre HM, SE, FR et l'agent Médiateur/Analogiste.

Contrairement aux diagrammes de processus précédents présentant des échanges relativement déstructurés sur des supports hétérogènes, ce processus de collaboration représenté dans la Figure 3.24 se structure autour d'aller-retours entre les agents collaborateurs et un agent central assistant la collaboration, cadrés dans un support uniforme et organisé. Ces aller-retours de communication entre les agents collaborateurs et l'agent médiateur et analogiste, permettent d'éviter toute perte d'information. Le résultat d'une telle itération collaborative peut être exploité pour des réajustement afin d'améliorer les suivantes comme représenté par la boucle de rétroaction formée dans le couloir du haut dédié à l'agent médiateur et analogiste.

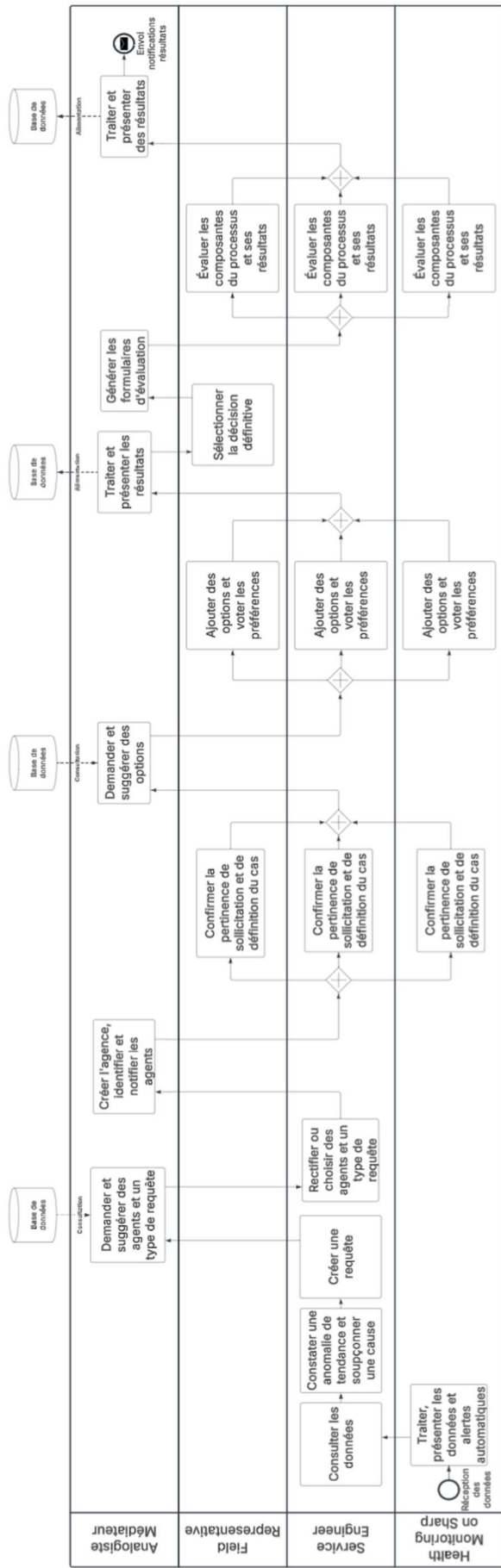


Figure 3.24 : Diagramme BPMN "As Is" de la collaboration augmentée.

3.4.3.2 Préconisation d'interface

Pour le prototype qui sera présenté ultérieurement, certaines spécifications peuvent être déduites. Lors du prototypage, comme représenté dans la Figure 3.25, l'interface doit contenir des sections fournissant à l'agent, ou utilisateur, les trois types de flux nécessaires à un agent apprenant : l'observation, l'action et les retours (feedback). La partie observation a pour objectif d'obtenir une conscience de situation, de se situer dans l'organisation, d'identifier les autres agents et expertises ou concepts associés, et de visualiser les collaborations (ou agences) créées. La partie action contient les actions de participation au processus décisionnel. Le fait de naviguer dans la partie observation est une action en lui-même, mais dans ce contexte, il est entendu par actions, les actions de collaboration décisionnelle de l'agent dans le système multi-agents mis en œuvre à cet effet. Les retours correspondent à ce qui est appelé « récompenses » dans le domaine de l'apprentissage par renforcement, même si elles peuvent être positives ou négatives. Cela permet d'en apprendre sur les conséquences des actions afin de les améliorer.

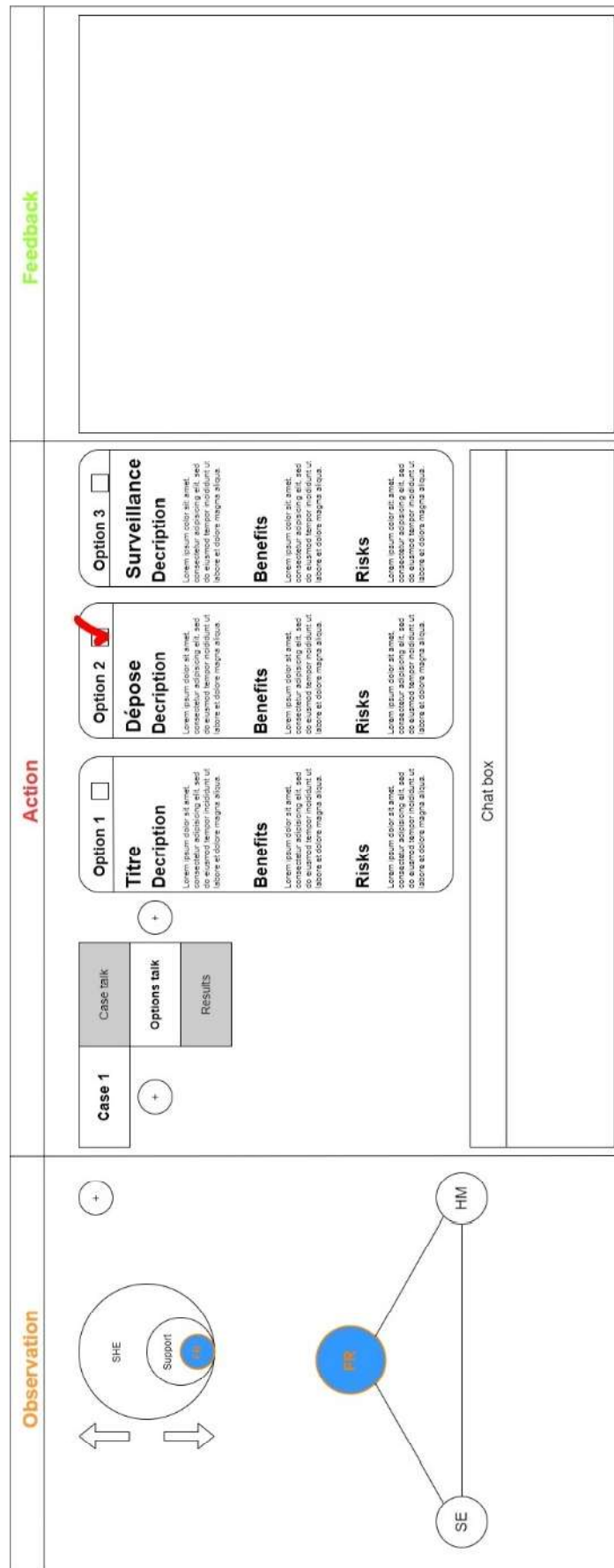


Figure 3.25 : Exemple d'aspect approximatif d'interface collaborative d'intégration des agents humains dans l'organisation.

3.5 Synthèse

Ce chapitre a montré qu'a été observée sur le terrain la présence de pratiques et technologies suivant des principes cognitivistes (généralistes mais rigides et peu intégrés) et connexionnistes (flexibles et bien intégrés aux pratiques, mais dont le cadre d'application est restreint), notamment avec des bases de connaissances et des outils d'intelligence artificielle, respectivement. Ces applications forment autant de composants dans le système sociotechnique qui les relie : l'organisation qui a été étudiée ici. Cependant, il a été observé une large hétérogénéité dans les supports d'échanges d'informations, et des pertes d'information, et une intégration qui peut être améliorée en vue des décisions collaboratives. Pour intégrer ces outils et savoir dans une modularité cohérente et apprenante à un niveau organisationnel, un support dédié est nécessaire. Ainsi, la coordination et l'apprentissage peut s'effectuer à un niveau de granularité supérieur, c'est-à-dire, de l'agent (ou module) vers les agences et les agences d'agences. Une adaptation de l'interface à la terminologie, aux taxonomies, ontologies et symboles de l'entreprise a été assurée pour une meilleure acceptabilité du jumeau numérique de l'organisation. A terme, ce système peut être assisté par un ou des agents machines pour le rendre plus intelligent dans son guidage des définitions de requêtes, mises en relation avec les autres agents et propositions d'options de réponses possibles ou souhaitables. L'interface doit comporter des fonctionnalités correspondant aux trois flux d'informations nécessaires à la bonne conscience de situation et au bon apprentissage d'un agent. En l'occurrence, dans les expérimentations avec des agents humains, il est question d'Interface Humain-Machine. L'ensemble de ces éléments illustre la capacité du cadre de modélisation proposé à représenter une organisation apprenante telle que celle étudiée pour la maintenance, et à l'analyser pour proposer des pistes d'amélioration, notamment pour outiller cette organisation.

Le chapitre suivant présente l'étude détaillée des éléments nécessaires à cette interface et leur implémentation. Enfin, il présente également le choix d'outil d'évaluation préexistants et la conception et l'implémentation de nouveaux outils.

Chapitre 4 Proposition d'un environnement pour la prise de décision

L'organisation a été observée à travers un cadre de modélisation pour mieux analyser l'existant en fonction des objectifs. Ce cadre a permis de repérer de potentiels points d'amélioration, notamment en ce qui concerne l'hétérogénéité des supports d'échange d'information, les pertes d'informations observées, et le manque d'intégration entre les outils existants dans le cadre des décisions collaboratives. Pour cette recherche visant une meilleure coordination et un apprentissage organisationnel accru, la création d'un prototype est nécessaire pour mettre en application ces concepts théoriques sur le terrain d'étude réel. Ce prototype de système d'aide à la prise de décision collaborative rend possible des tests utilisateurs et des retours concrets pour évaluer la mise en application du modèle dans l'organisation. Les hypothèses soulevées lors de la phase conceptuelle peuvent ainsi être validées ou invalidées par la confrontation avec la pratique.

L'humain étant un facteur fondamental dans le fonctionnement de l'organisation, l'implémentation du prototype s'inscrit dans une démarche orientée vers l'intégration de l'humain dans le système (Human-System Integration - HSI). Le système a vocation non seulement à intégrer l'humain, mais également à le prendre en compte dans la pratique de son activité dès le début de sa conception. Le prototype doit donc être conçu pour l'humain et par l'humain à l'aide d'une Conception Centrée Utilisateur (CCU). Cette méthodologie est détaillée dans la section suivante.

Le chapitre précédent a mis en lumière plusieurs limites dans les pratiques d'échange et de traitement de l'information au sein de l'organisation : une hétérogénéité des supports, des pertes d'information, et une faible intégration des outils existants dans les processus de décision collaborative. Pour répondre à ces points d'amélioration, un modèle de l'organisation a été développé, servant de base à la création d'un prototype de système d'aide à la décision. Ce prototype vise à concrétiser les concepts théoriques sur le terrain, à travers des tests utilisateurs permettant de valider ou d'invalidier les hypothèses formulées lors de la phase conceptuelle.

L'humain étant un facteur central du fonctionnement organisationnel, l'implémentation s'inscrit dans une logique d'intégration humain-système (Human-System Integration – HSI). Le prototype est donc conçu pour et par l'humain, selon les principes de la Conception Centrée Utilisateur (CCU), détaillés dans la section suivante.

4.1 Conception de l'environnement numérique

4.1.1 Démarche adoptée

La démarche HSI repose sur la prise en compte de l'humain dès les premières étapes de la conception d'un système. En effet la considération de ses objectifs, besoins, capacités et limites cognitives ou physiques permet de maximiser l'efficacité et la satisfaction des utilisateurs finaux.

Au sein de ce grand domaine, la CCU permet de confronter immédiatement le système en devenir aux potentiels utilisateurs en les impliquant dès les premières phases de conception. En ce sens, la norme ISO 9241-210 (Maguire, 2013), anciennement ISO 13403, donne un cadre référentiel pour la mise en œuvre de cette démarche. Cette norme souligne l'importance de l'analyse des besoins, de l'évaluation continue et de l'implication des utilisateurs tout au long de la conception. Elle recommande notamment les pratiques suivantes :

- L'analyse de l'activité : consiste à étudier le contexte d'utilisation du système par l'observation directe des utilisateurs, des entretiens ou des questionnaires. Ces techniques permettent d'étudier l'activité effective, qui diffère toujours des tâches prescrites (Rabardel & Beguin, 2005);
- Les « *focus groups* » : permettent de collecter des avis collectifs sur des concepts, pour une meilleure compréhension des besoins et difficultés communs ;
- Le tri de cartes : consiste en la catégorisation logique de l'information ou les fonctionnalités d'un système, pour guider la conception de l'interface dans son organisation ;
- Les tests utilisateurs : consistent à effectuer des tests pratiques dans des conditions réelles ou réalistes pour évaluer les performances et la satisfaction des utilisateurs. Cela garantit l'aspect intuitif du système ainsi que sa réponse adaptée aux besoins.

Cette approche permet d'axer la conception des aspects techniques du système sur l'utilisateur humain. C'est sur cette approche que repose la modélisation du prototype abordé dans la section suivante.

4.1.2 Modèles implémentés

Le chapitre précédent a montré une analyse d'activité qui fait partie de la démarche HSI et comprend l'observation des pratiques, l'analyse des outils, de la documentation et des communications comme effectuées dans les Section 3.4.1 et Section 3.4.2.

Cette analyse a été enrichie par des réunions permettant de questionner et d'échanger avec des collaborateurs de différents métiers et services. Le nombre de personnes invitée en réunion a été dans un premier temps variable, allant d'un entretien individuel à une grande réunion de service pour finalement se concentrer sur des entretiens plutôt individuels. En effet, à la suite de ces essais, les focus groups ont été délaissés au profit des entretiens individuels qui se sont avérés plus riches grâce à une parole plus libérée.

Quant au tri de carte, cette technique est intéressante pour le développement d'interface ou, de manière générale, de systèmes intuitifs car cela permet de se baser sur les modèles mentaux déjà existants des utilisateurs. Ainsi cette base diminue la complexité d'apprentissage et donc le frein à l'adoption. Il consiste à classer des éléments en catégories

et sous-catégories (Spencer, 2009). Cependant, un cadre conceptuel préexistant est nécessaire. Le prototype qui fait l'objet de cette étude appartient en lui-même à un cadre non exploré et doit être conçu à partir de rien, bien qu'il connecte des concepts existants comme la communication, le diagnostic ou le retour d'expérience. Sa conception n'opte donc pas pour un tri de cartes à ce stade. Elle se réfère plutôt à la littérature concernant la prise de décision partagée, notamment dans le domaine de la santé (Elwyn et al., 2012) présenté Figure 2.2 dans la Section 2.4.2 et sur la prise de décision, afin d'initier son développement et ses tests dans un cadre éprouvé.

Les tests utilisateurs sont cependant indispensables pour assurer l'adaptation de l'outil au terrain ainsi que son adoption dans la pratique. En effet, si sa finalité est une bonne intégration de l'humain dans le système qu'est l'organisation, sa conception doit également reposer dessus. Ces tests utilisateurs permettent de tester l'utilisabilité du système, c'est-à-dire, selon la norme ISO 9241-11 (Bevan, 2009), tant dans son efficacité et son efficience que dans la satisfaction de son utilisation. Pour cela, un modèle du système pouvant embrasser des scénarios variés doit être établi pour pouvoir développer le prototype et son interface.

4.1.2.1 Structuration du SMA « logiciel »

La Figure 4.1 montre comment les actions d'un agent sur son environnement et les observations de cet environnement peuvent lui permettre d'évaluer l'efficacité (effectivity) de ses propres actions. Ceci apporte les conditions nécessaires à une réflexivité, c'est-à-dire l'inclusion de soi-même et son propre impact dans l'analyse de la situation. Cette réflexivité permet à son tour un apprentissage et une amélioration des actions, comme vu dans la Section 2.4.4.3. Ce processus peut inclure plusieurs agents interconnectés ; les expériences et évaluations des uns peuvent de cette manière améliorer les actions des autres et donc alimenter un apprentissage organisationnel.

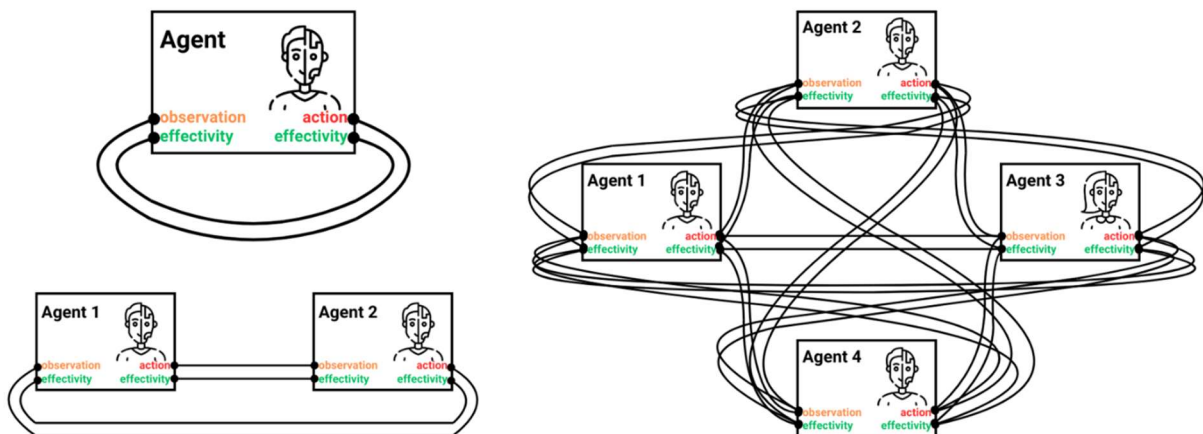


Figure 4.1 : Modèle général d'échanges dans la prise de décision collaborative permettant un apprentissage par renforcement.

4.1.2.2 Interrelations des agents logiciels et humains

Cette vision très haut niveau constitue un référentiel utile pour représenter le système, mais elle ne permet pas en l'état une mise en œuvre concrète. Pour passer de ce cadre général à un prototype opérationnel, il est nécessaire de décomposer ces catégories génériques jusqu'à un niveau suffisamment précis pour permettre une implémentation technique. Cette décomposition peut être guidée par les scénarios réels tels que celui présenté dans la Section 3.4.2.1. En maintenant une vision multi-agents, la Figure 4.2 montre les échanges

d'informations effectués lors des communications du cas réel « AS IS » représenté sur la Figure 3.22. Ceci permet de représenter des échanges réels et identifiés dont la nature peut être par la suite déterminée. Chaque boîte correspond à un agent. Les éléments représentés sur sa droite sont des sorties, correspondant aux actions, et les éléments sur sa gauche sont des entrées, correspondant aux observations. Les entrées proviennent de sorties. Cette représentation fait à nouveau ressortir l'isolement de certains agents appartenant pourtant au périmètre de compétences menant à la détection et résolution d'un problème, en l'occurrence le HM.

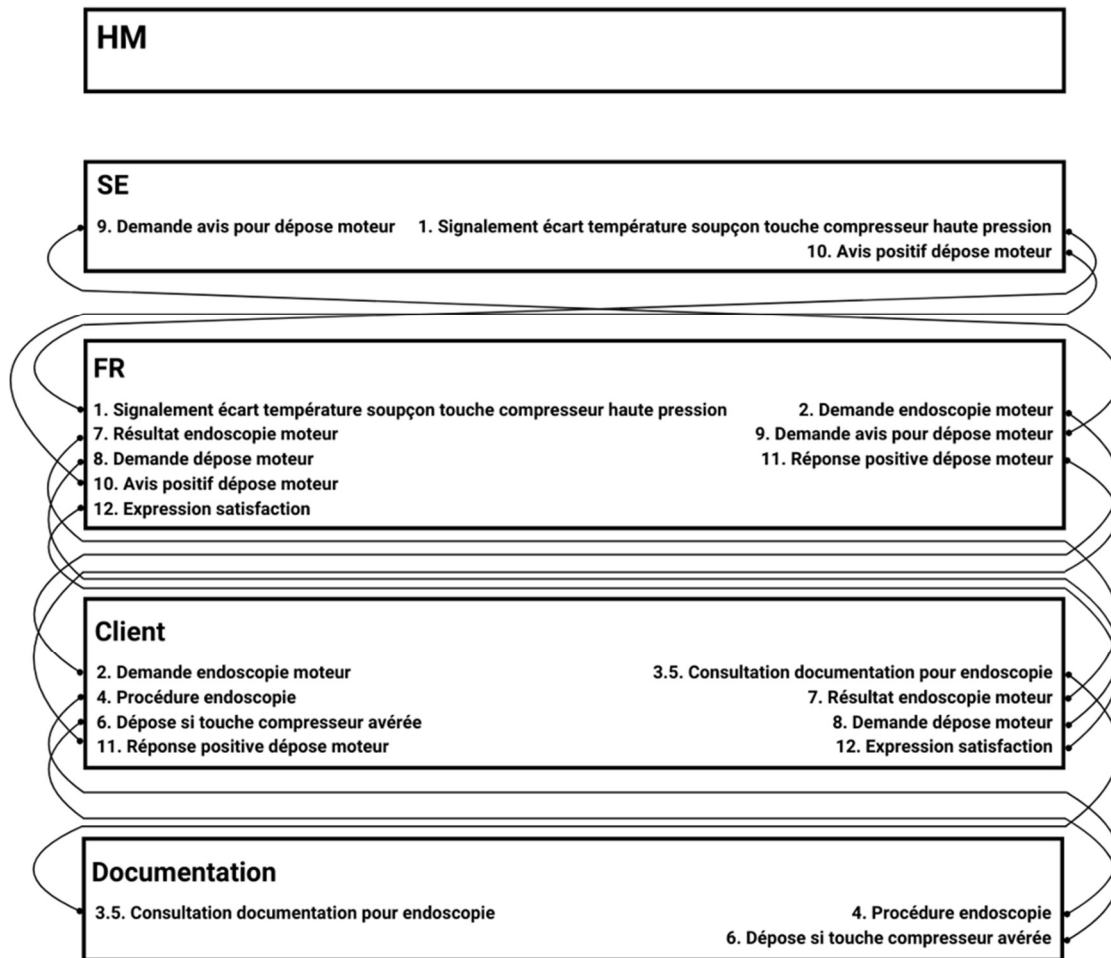


Figure 4.2 : Répartition multi-agents des échanges « AS IS » du scénario 1.

Une fois établie la représentation multi-agents des échanges tels qu'ils ont eu lieu, l'agent médiateur, qui sera interfacé avec les agents existants, peut être ajouté. Cela donne une représentation, Figure 4.3, des échanges tels qu'ils devraient avoir lieu en présence du système. À des fins de simplifications, les objets et agents extérieurs à l'entreprise sont supprimés. Ici, les résultats des échanges extérieurs sont agglomérés avec le FR qui est l'agent interface avec l'extérieur de l'organisation.

En parallèle, les échanges peuvent être décomposés dans la sémantique du milieu numérique de l'organisation, c'est-à-dire dans la forme habituelle des codes informatiques composant les systèmes développés et utilisés dans l'organisation, d'où l'utilisation de l'anglais et des formes

de type « *is_exp_concerned* » par exemple. Cet exemple correspond au nom d'une variable de type booléen qui ne peut avoir que deux modalités : « true » (vrai) ou « false » (faux). Il s'agit en l'occurrence de la forme contractée de « is expert concerned » (l'expert est concerné) pour le flux correspondant à la validation ou non de chaque expert sollicité de la pertinence du fait qu'on fasse appel à lui. Sur le diagramme, il s'agit de la première sortie émise par le HM et par le FR qui ont été sollicités par le SE à travers le Mediator (agent médiateur).

Cela permet de développer ensuite cette spécification jusqu'au bas niveau des types de données. Il est nécessaire d'obtenir une représentation exhaustive des flux de données échangées entre l'agent médiateur et les autres agents.

Cet agent médiateur permet d'arbitrer les échanges et facilite la collecte des données issues de ces échanges. Chaque agent échange donc avec tous les autres agents à travers l'agent médiateur. L'élément d'évaluation de l'efficacité est ajouté pour rappeler qu'il peut être construit par la suite, selon les besoins et orientation, sur les données issues de ces échanges. L'intérêt d'obtenir des données de bas niveau est la flexibilité pour d'éventuels futurs traitement de données et pour ajouter des indicateurs pertinents.

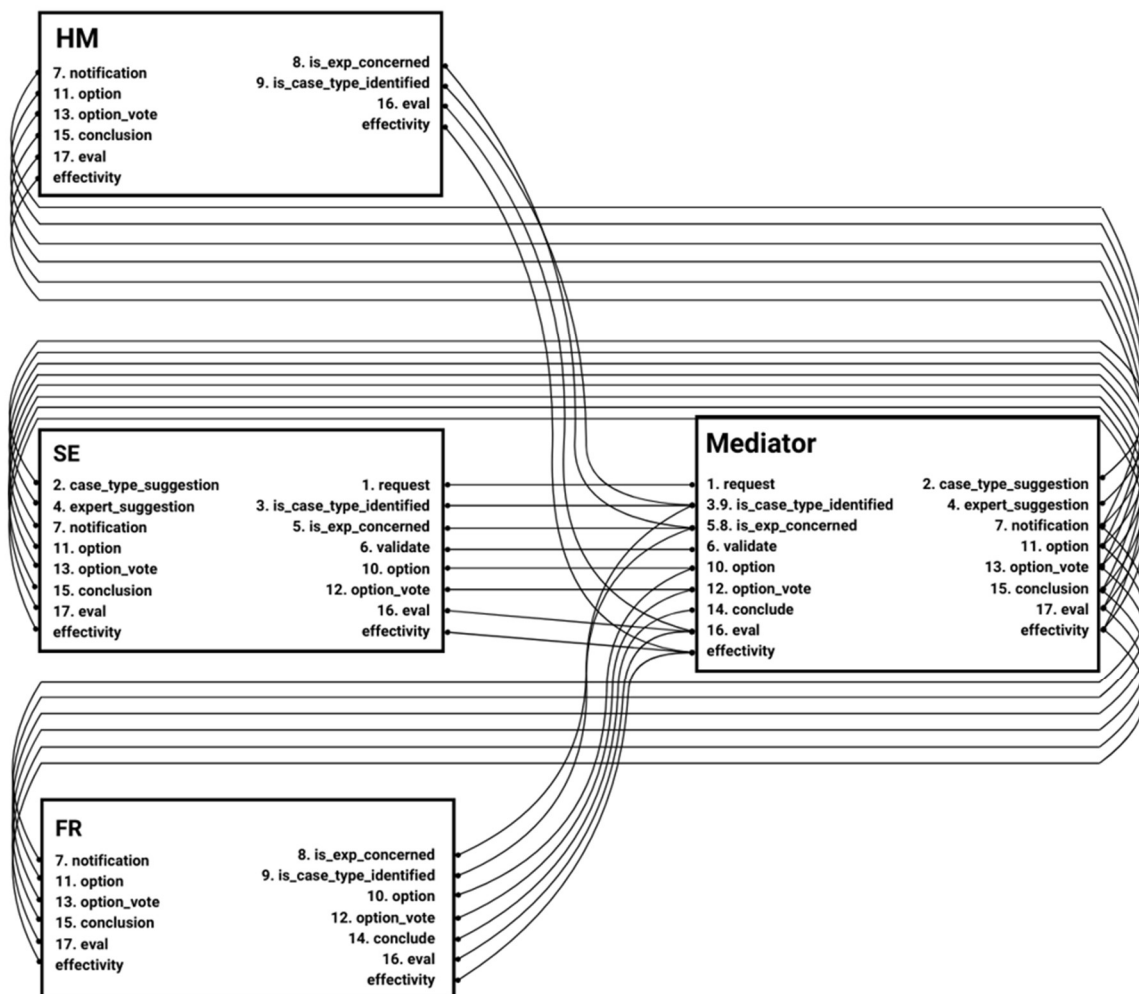


Figure 4.3 : Répartition multi-agents des échanges «TO BE» du scénario 1.

Pour clarifier cela, une représentation peut être faite, comme sur la Figure 4.4, des échanges entre l'agent médiateur et chaque autre agent séparément. L'accumulation des listes d'échanges entre le médiateur et chaque agent au cours de différents scénarios permet d'identifier tous les types d'échanges potentiellement nécessaires à la résolution d'un problème. L'objectif est d'obtenir une liste aussi exhaustive que possible, jusqu'à atteindre un point de saturation, c'est-à-dire lorsque l'analyse de nouveaux scénarios ou agents ne génère plus de nouveaux flux de données. Cette notion de saturation est inspirée de la méthodologie qualitative (Glaser & Strauss, 2017), où elle marque la complétude des informations recueillies. Dans cet exemple, le FR a été supprimé à des fins de clarté puisqu'il est quasiment identique au HM.

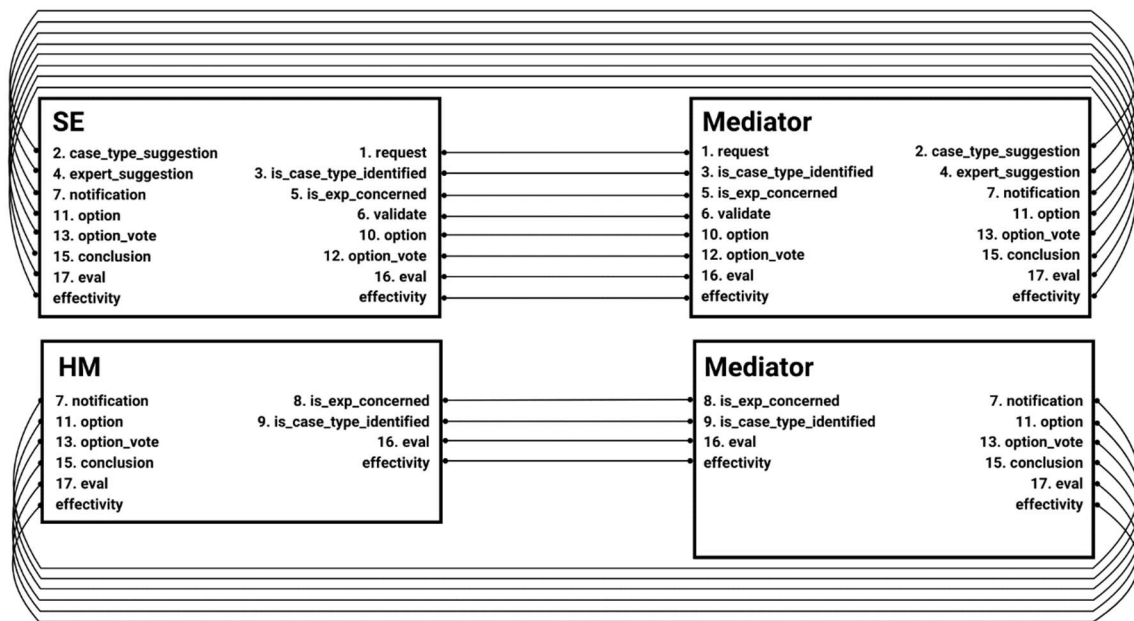


Figure 4.4 : Séparation des échanges de chaque agent avec le prototype.

4.1.2.3 Flux informationnels

Le fait de nommer les échanges dans un vocabulaire proche des pratiques de programmation informatique facilite la détermination des différents types de données qui les composent, comme représenté sur la Figure 4.5. Certains noms de la représentation précédente offraient des pistes en suggérant un type de données particulier. Par exemple « is_case_type_identified » et « is_exp_concerned » dans la Figure 4.4 suggèrent chacun un booléen. Ces booléens indiqueraient, respectivement, si l'agent a validé (true) ou non (false) le fait que le type de cas traité est bien identifié et s'il est bien un expert concerné par ce cas. Ces pistes ne sont pas forcément des choix définitifs. Concernant ces deux exemples, ils sont devenus des entiers dans la Figure 4.5, permettant de les quantifier et permettant les nuances. Le booléen vient ensuite valider l'ensemble contenant ces valeurs.

Chaque étape de conception permet d'affiner le système pour qu'il respecte les concepts autour de la cognition évoqués dans le Chapitre 2. Dans cet exemple, la quantification de la pertinence de chaque expert participant à la prise de décision produit les données nécessaires à un système s'inspirant du système d'apprentissage stigmergique du cerveau vu dans la Section 2.4.4.4 qui traite des réseaux d'influence neuronaux contextuels (dans certains cas,

un neurone va en activer un autre qui n'est pas forcément voisin). Cette valeur, plutôt qu'une donnée binaire « tout ou rien », permet d'établir des « distances », non plus spatiales mais conceptuelles, telles que représentées sur la Figure 2.7 de la section susnommée. Ces distances peuvent se traduire par des seuils de déclenchement de suggestions d'experts à solliciter pour des collaborations, tels que représentés dans la Figure 3.3 de la Section 3.2.1 portant sur l'application des neurosciences dans la modélisation du système.

De la même manière, l'échange d'« option », correspondant à la communication d'un choix possible pour résoudre un problème, s'est décomposé en un identifiant, titre, description, bénéfices, risques et enfin un vote permettant d'exprimer les préférences.

Cette décomposition s'inspire largement de la prise de décision partagée issue du domaine médical représentée sur la Figure 2.2 puis adaptée au modèle sur la Figure 3.9 pour rendre ce processus possible.

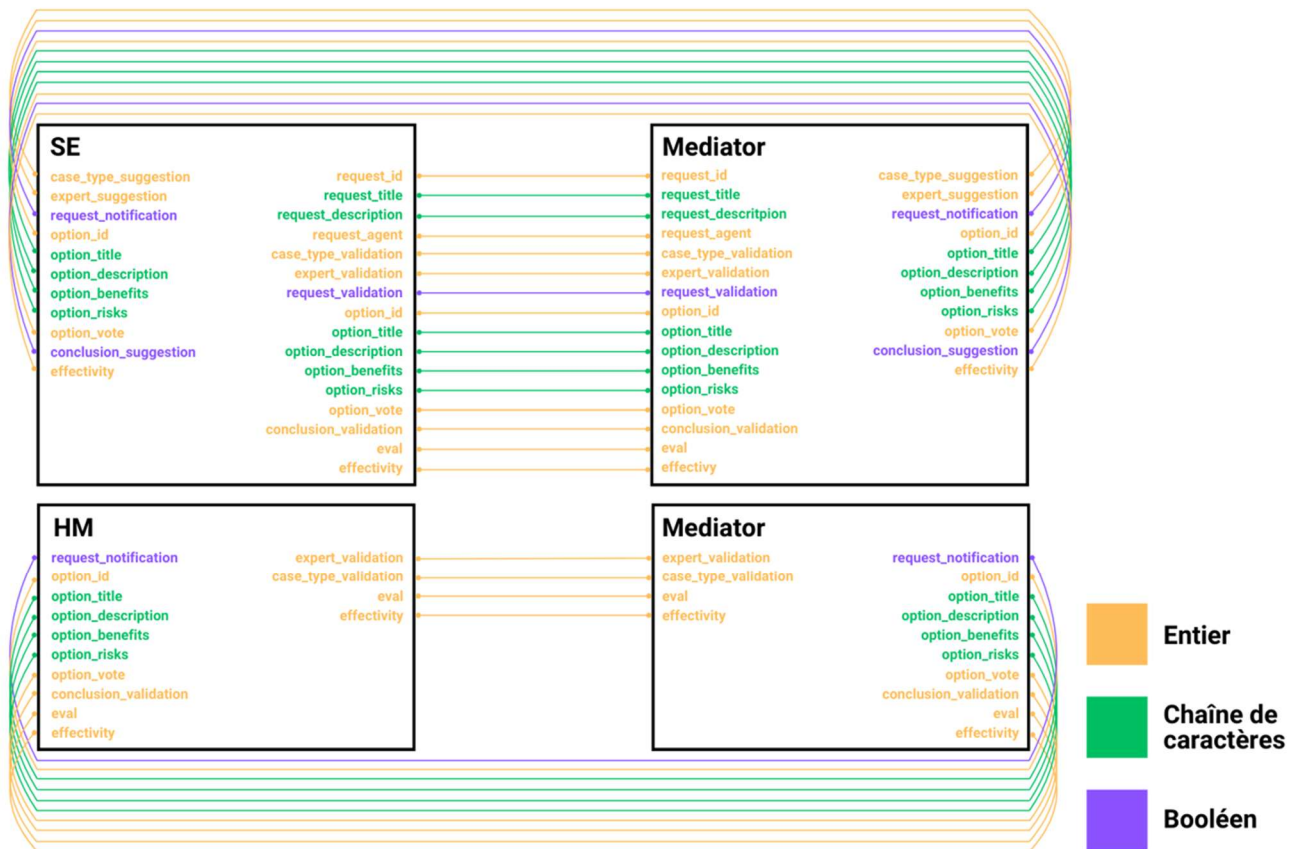


Figure 4.5 : Décomposition des échanges par types de données.

Ces exemples du SE et du HM révèlent certains flux de données identiques et d'autres qui diffèrent. Il en va de même pour tous les agents des différents scénarios. La Figure 4.6 présente la fusion de ces listes de flux obtenus. Après saturation, elle représente donc un agent correspondant à un utilisateur générique et ses échanges avec l'agent correspondant au prototype.

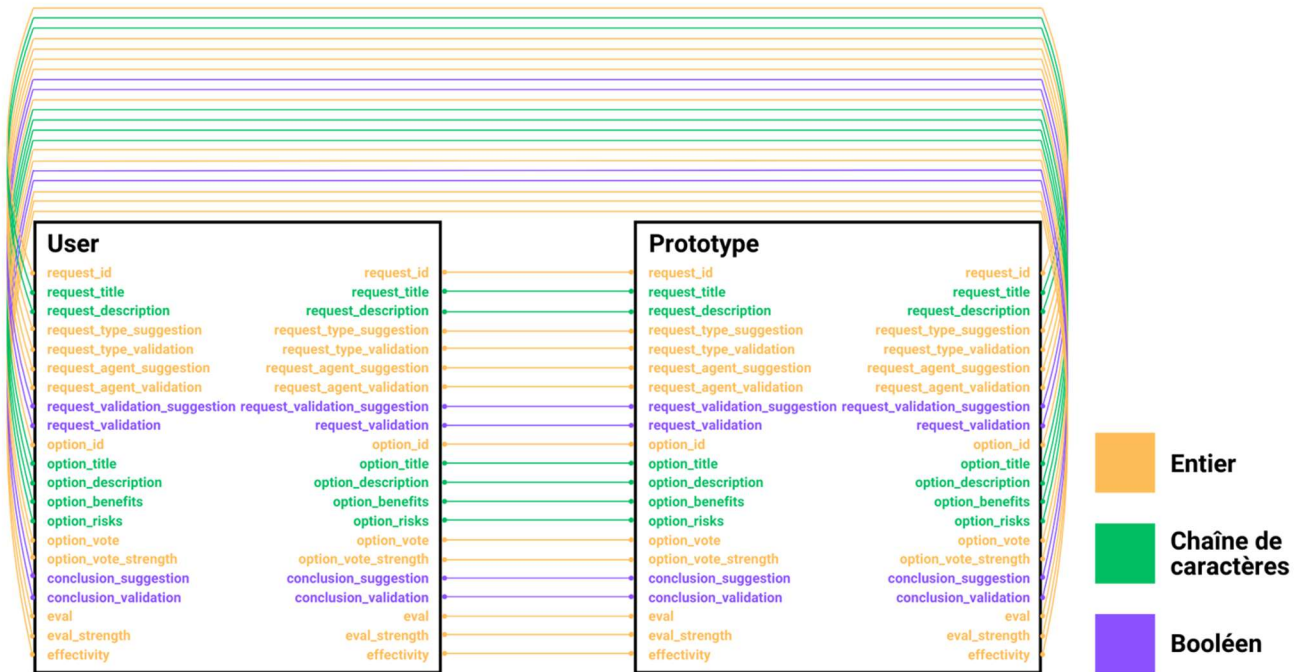


Figure 4.6 : Flux de données exhaustifs dans les échanges entre un utilisateur générique et le prototype.

4.1.2.4 Prise de décision

Il ressort de ce modèle qu'un agent participant à la totalité des échanges possibles suivra un processus s'articulant autour de trois phases :

- La définition d'une requête : elle correspond à la création d'un problème à résoudre, ici « requête », incluant ses :
 - Identifiant : pour la création de l'objet lui-même et son traitement informatique, dans les règles de la programmation orientée objet qui est d'usage dans l'entreprise ;
 - Titre : pour résumer en quelques mot de quoi il s'agit ;
 - Description : pour détailler le cas en question ;
 - Suggestion du type : pour suggérer une classification du type de problème auquel l'occurrence appartient étant donné que l'agent créateur de la requête peut ne pas savoir ou ne pas être sûr. En effet, la sollicitation des autres agents correspond à un besoin de collaboration car l'auteur de la requête ne possède pas toute la connaissance nécessaire. Des suggestions peuvent être faites par tous les agents, y compris l'agent machine médiateur si une intelligence est développée en lui, par exemple ;
 - Validation du type : pour valider un type, avec un entier, permettant la nuance pour un apprentissage plus fin ;
 - Suggestion d'agent : pour suggérer des agents. Cela permet notamment à l'agent machine médiateur de suggérer des agents pertinents s'il en a la capacité, aux agents sollicités d'en suggérer d'autre qui peuvent être méconnus par l'agent initiateur de la requête, ou à l'agent initiateur de suggérer des agents dont il n'est pas sûr, sans les solliciter dès la première itération et en déléguant ce choix aux autre agents potentiellement plus connaisseurs ;
 - Validation d'agent : pour que chaque agent puisse quantifier la pertinence de sa propre sollicitation dans le cas traité ;

- Suggestion de validation : permet d'émettre une pré-validation afin de permettre les rectifications et suggestions avant la validation définitive, ou pour permettre à l'agent ayant autorité de valider à sa place ;
- Validation : la validation définitive de la requête permet de verrouiller la définition de la requête y compris ses agents participants, et d'enclencher la phase suivant de délibération.
- La délibération : elle correspond à la communication des différents choix d'actions (ou d'inaction) possibles, ici « option », par les différents agents selon leurs compétences, ainsi que leur avis sur chacun d'entre eux. Cela inclut :
 - Identifiant : pour la création de l'objet « option » et son traitement en l'identifiant de manière unique ;
 - Titre : pour repérer facilement l'option en la synthétisant en quelques mots ;
 - Description : pour détailler et expliquer l'option ;
 - Bénéfices : pour une explication des avantages et de l'état final recherché de l'option ;
 - Risques : pour une explication des risques associés au choix de cette option ;
 - Vote : pour émettre un vote sur les options afin d'exprimer ses préférences. Il s'agit d'un entier qui permet une classification de l'option préférée à l'option pour laquelle l'agent est le moins favorable ;
 - Force de vote : pour émettre une éventuelle quantification de chaque vote pour exprimer une nuance dans la force de conviction concernant l'option ;
 - Suggestion de validation : permet d'émettre une pré-validation permettant à un agent d'indiquer la fin de son intervention sans pour autant clôturer la délibération. Les autres agents peuvent toujours effectuer des ajouts et modifications avant la validation définitive de l'agent ayant autorité sur la décision finale ;
 - Validation : permet de clôturer la délibération et d'enclencher la phase suivante d'évaluation.
- L'évaluation : cette phase correspond à l'évaluation des différents éléments du processus de la requête et de sa résolution. Elle comprend des valeurs entrées par chaque agent pour donner une évaluation a posteriori. Cette phase n'a pas besoin d'être validée car la résolution du problème peut rester en boucle ouverte en attendant les retours, et ce, pour une durée indéterminée. Elle comprend l'évaluation de :
 - La pertinence (binaire) de :
 - La sollicitation de chaque agent : permet à chaque agent d'évaluer si l'implication de chaque agent dans la résolution de problème était pertinente ou non, y compris soi-même ;
 - La définition de la requête : pour évaluer si le problème était bien défini ;
 - La réponse finale : pour évaluer le bien-fondé de l'option retenue pour répondre à la requête.
 - La force (valeur), le cas échéant, de la pertinence de :
 - La sollicitation de chaque agent : permet de pondérer la pertinence, si elle est confirmée, de sollicitation de chaque agent ;
 - La définition de la requête : permet d'apporter une pondération ;
 - La réponse finale : permet d'apporter une pondération.

- Le retour de conséquences futures : il est par défaut « en attente » et peut être changé pour les états « Sans effet » ou « Résolu ».

Le Tableau 4.1 synthétise tous les échanges d'informations et leurs types de données supports qui constituent les trois phases nécessaires pour que les itérations de prise de décision collaborative puissent faire émerger un apprentissage par renforcement asynchrone.

Tableau 4.1 : Types de données des échanges qui composent les phases de la prise de décision collaborative.

	Phase	Echange	Type
Prise de décision collaborative	Définition de requête	Identifiant	Entier
		Titre	Chaîne de caractères
		Description	Chaîne de caractères
		Suggestion du type	Entier
		Validation du type	Entier
		Suggestion d'agent	Entier
		Validation d'agent	Entier
		Suggestion de validation	Booléen
		Validation	Booléen
	Délibération sur les options	Identifiant	Entier
		Titre	Chaîne de caractères
		Description	Chaîne de caractères
		Bénéfices	Chaîne de caractères
		Risques	Chaîne de caractères
		Vote	Entier
		Force de vote	Entier
		Suggestion de validation	Booléen
		Validation	Booléen
	Évaluations de la collaboration	Pertinence	Entier
		Force de pertinence	Entier
		Retour de conséquences	Entier

4.2 Implémentation du prototype

Les modèles précédents ont été élaborés dans l'objectif d'aboutir à l'implémentation d'un prototype. Le prototype a pour but de permettre des mises en situation réalistes lors d'expériences effectuées auprès de réels collaborateurs de l'entreprise. Dans le cadre de ces travaux, ce projet qui a abouti notamment à un prototype simulant un jumeau numérique de l'organisation pour la prise de décision collaborative, a été nommé Système Organique de Médiation Adaptative (SOMA). L'acronyme SOMA renvoie, en grec ancien, à la notion de corps, d'un tout unifié, ce qui fait écho à l'objectif du prototype visant à intégrer de manière cohérente agents humains et agents logiciels et leur expérience au sein d'un même système.

4.2.1 Démarche adoptée

Le prototype nécessite de mettre en œuvre le nécessaire pour effectuer des expériences. Pour cela, une simulation du système suffit. Cette simulation peut se faire à l'aide d'une interface simulant des actions des agents tiers et réagissant aux actions des agents testés. Une interface initiale doit donc être proposée pour pouvoir être testée et améliorée. Pour produire cette interface à partir de rien, sa conception repose sur les critères d'ergonomie de (Scapin & Bastien, 1997) concernant les détails la rendant intelligible et intuitive. La structure générale autour de laquelle se forme l'interface se base sur le modèle de prise de décision partagée (Elwyn et al., 2012) évoquée dans la Section 2.4.2 sur la prise de décision. Enfin, pour affiner cette structure générale et développer les détails structurant ses différentes parties, ces derniers se basent sur le modèle développé précédemment des échanges entre les agents.

Les critères ergonomiques décrits par Scapin et Bastien permettent de guider les détails de l'interface. Ces critères couvrent divers aspects comme la guidance (la manière dont l'interface guide l'utilisateur), la gestion de la charge de travail cognitive (minimisation de la charge), la consistance (cohérence des éléments et leur répétition ou variation selon le contexte) et la gestion des erreurs. La démarche de respect de ces critères permet de concevoir une interface intuitive et accessible qui minimise l'effort d'apprentissage de son utilisation en facilitant la navigation. Par exemple, l'aspect de la guidance comprend le retour immédiat comme le changement de couleur d'un bouton au clic pour signaler à l'utilisateur la bonne détection et prise en considération de son action par le système. Ces détails permettent d'améliorer l'efficacité et l'expérience utilisateur sans influencer le contenu du système et d'orienter les résultats des expériences de son utilisation sur le fond plutôt que sur la forme. Ce fond se base sur le modèle de prise de décision partagé évoqué précédemment, qui se structure autour de trois parties de délibération menant des préférences initiales aux préférences informées de la personne en charge de la décision qui suit cette délibération. Ces trois parties sont : la discussion du choix en lui-même, puis la discussion des options et enfin la discussion de la décision.

Cette délibération constitue un moyen d'inclure plusieurs agents dans le processus décisionnel. Elle permet de structurer une prise de conscience de situation multi-agents, élément manquant dans un contexte organisationnel avec une connaissance et expertise distribuée. Comme le montrent les parties bleues de la Figure 4.7, le processus de délibération

de (Elwyn et al., 2012) répond à un besoin de fonctionnement impliquant plusieurs acteurs dans le processus de conscience de situation dans la prise de décision dynamique de (Endsley, 1995). De même, les éléments de cette dernière viennent compléter le processus linéaire prise de décision partagée en bouclant le processus, ce qui est nécessaire pour permettre un apprentissage.

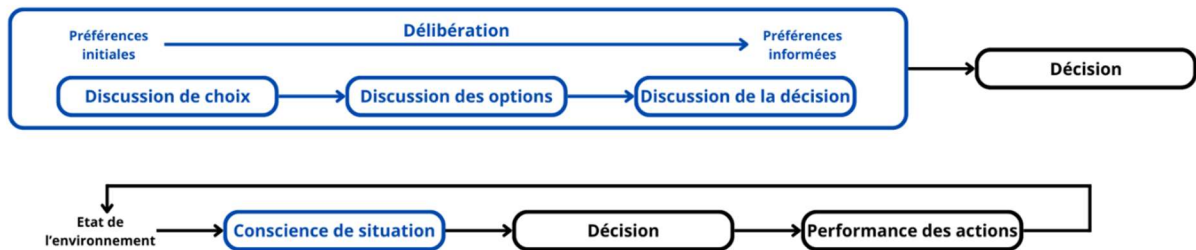


Figure 4.7 : Modèles complémentaires simplifiés de délibération de (Elwyn et al., 2012) et de conscience de situation dans la prise de décision dynamique de (Endsley, 1995)

De plus, la modélisation des échanges entre un utilisateur et le prototype présentée dans la partie précédente fait ressortir les détails structurels sur lesquels l'interface du prototype peut reposer. En effet, trois phases principales sont ressorties : la définition d'une requête, la réponse à cette requête avec la meilleure option connue parmi celles présentées par les participants, et enfin l'évaluation des différents éléments du processus décisionnel par chaque agent. Cela vient conforter les schémas précédents de la Figure 4.7 et les étapes qu'ils soulignent comme étant nécessaires. Les flux de chaque phase peuvent donc être regroupés dans différents onglets. Les interfaces du prototype peuvent ensuite se développer autour de ce noyau : « définition de la requête », « délibération sur les options » et « évaluation ». Concernant les étapes de la prise de décision partagée, les éléments correspondant à la discussion du choix s'inscrivent dans l'onglet « Définition de la requête » et ceux correspondant à la discussion des options, la discussion de la décision et la décision s'inscrivent dans l'onglet « Délibération sur les choix ». Concernant les étapes complémentaires de la prise de décision dynamique, les éléments de l'évaluation des performances des actions peuvent s'inscrire dans un onglet « Evaluation » et la représentation de l'état de l'environnement dans un onglet « Résultats ». Ce dernier permet de représenter les données établissant une base d'amélioration de chaque étape du processus décisionnel dans des boucles d'apprentissage. Comme le montre la Figure 4.8, les données de résultats issues des interactions et évaluations permettent d'alimenter l'amélioration de chacune des phases du processus décisionnel. Ces boucles de rétroaction alimentées en grande partie par les données internes qui intègrent l'expérience sont au cœur de l'apprentissage organisationnel.

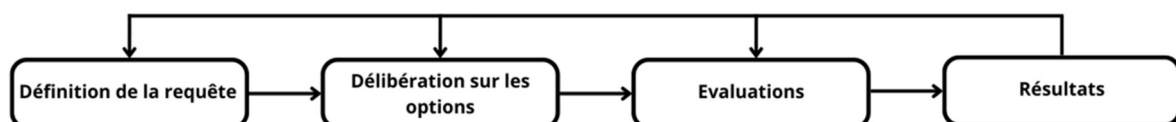


Figure 4.8 : Onglets et boucles d'apprentissage décisionnel.

Ce principe d'un système qui s'alimente majoritairement d'informations internes plutôt que de données externes immédiates inspire directement la conception du système décisionnel. En effet, les données de résultats, d'évaluations et de performances collectées lors des prises de décision collaboratives alimentent le système à travers des boucles d'apprentissage (voir la Figure 4.8), lui permettant d'optimiser ses recommandations, ses filtres, voire son interface de présentation.

Autrement dit, comme dans le traitement visuel, les entrées initiales (ici, la requête posée) ne sont qu'une petite part du processus : l'essentiel de l'enrichissement informationnel provient des rétroactions internes générées au fil des délibérations, des choix et des évaluations collectives. Ce fonctionnement transforme l'interface en un système apprenant, où chaque itération d'usage contribue à ajuster le traitement de l'information, comme le cerveau ajuste la perception en fonction du contexte, des attentes et des expériences antérieures.

Métaphore 4.1

Un parallèle peut être fait avec les processus cognitifs du cerveau. Par exemple, au niveau de la perception visuelle. Étant un processus de captation d'ondes électromagnétiques (lumière) situé à une extrémité physique par rapport au centre nerveux (cerveau), il pourrait être vu comme un simple processus linéaire de transfert d'information du milieu extérieur vers le milieu intérieur. C'est effectivement comme cela que ce processus a été traditionnellement représenté (Funke et al., 2002), comme représenté sur la Figure 4.9, avec une information captée par la rétine de l'œil puis véhiculée vers le Cortex Visuel (CV) via les cellules du Noyau Géniculé Latéral (NGL) initialement vues comme de simples intermédiaires.

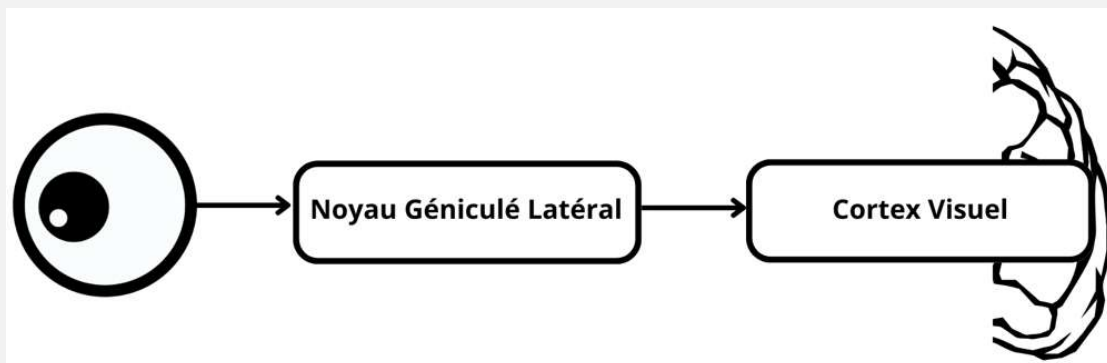


Figure 4.9 : Représentation séquentielle du processus visuel.

Mais les recherches ont finalement montré que seulement 5% des entrées reçues par les cellules relais du NGL provient directement de la rétine et 50% du CV (Duménieu et al., 2021). Le reste des entrées proviennent d'autres régions cérébrales (comme le tronc cérébral, le noyau réticulaire thalamique et autres aires corticales). La majorité n'est donc pas d'origine rétinienne comme le montre la Figure 4.10 dont les épaisseurs des flèches représentant les transferts d'information sont proportionnelles les unes par rapport aux autres. Il y a une interconnectivité dense qui reflète le rôle de modulation du NGL de l'information visuelle, intégrant des signaux sensoriels et des signaux de processus cognitifs, qui permet au NGL de jouer un rôle actif dans la régulation de l'attention, jusqu'au mouvement des yeux, et dans le traitement de la perception, ce qui va bien au-delà de la fonction de simple relais visuel (Einevoll & Halnes, 2022).

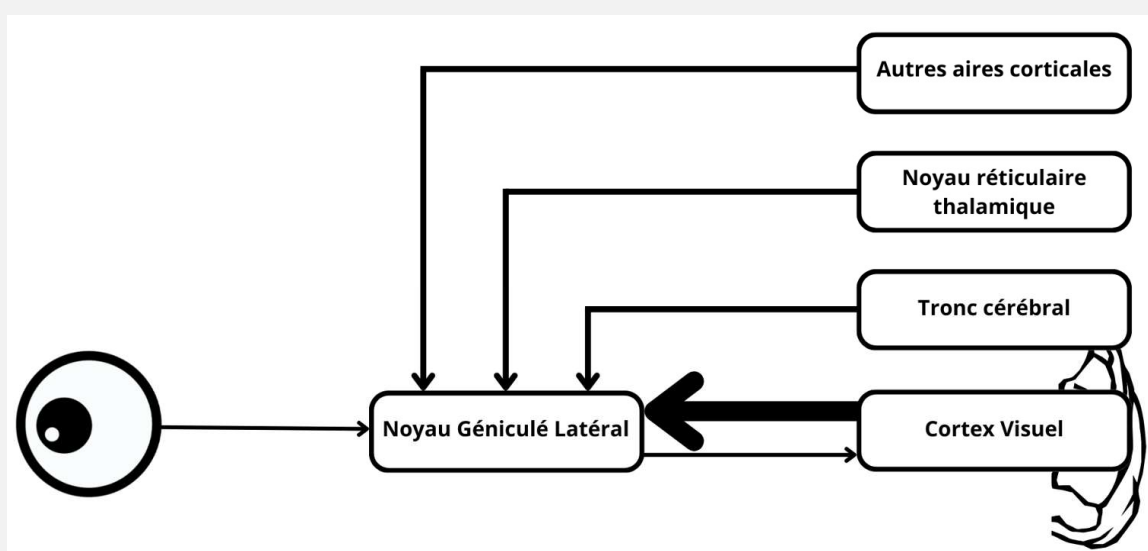


Figure 4.10 : Représentation complexe des rétroactions dans le processus visuel.

Tout comme le prototype implémenté présenté dans la Section 4.2.2 qui suit, tous les outils d'évaluation choisis ou conçus dans cette étude sont accessibles à l'utilisateur via différents onglets d'un navigateur web, comme représenté sur la Figure 4.11. Chaque phase de l'expérience correspond ainsi à un onglet distinct. L'utilisateur peut librement naviguer de l'un à l'autre selon l'avancement de la procédure expérimentale.

Le prototype interactif, décrit dans la Section 4.2.2 qui suit, est un programme autonome accessible depuis le deuxième onglet. Il est testé par les participants à l'aide de scénarios. Les quatre autres onglets sont consacrés à des évaluations complémentaires. Celles-ci prennent deux formes principales : d'une part, des questionnaires, utilisés pour recueillir des informations sur les caractéristiques de l'utilisateur, l'utilisabilité du système ou la cognition collective ; d'autre part, des mises en situation expérimentales, utilisées pour observer l'impact de certains éléments du prototype. C'est notamment le cas d'un dispositif spécifique conçu pour explorer les effets d'indicateurs stigmergiques, présenté plus en détail ultérieurement.

La collecte des données personnelles s’effectue dans le premier onglet, via un formulaire en ligne créé avec Microsoft Forms². Ce même formulaire inclut ensuite la CCS, qui vise à établir une première mesure de la cognition collective du groupe avant l’expérimentation.

Le troisième onglet contient un second formulaire Microsoft Forms, utilisé après l’interaction avec le prototype. Il comprend le SUS ainsi que quelques questions ouvertes destinées à recueillir des retours qualitatifs sur l’expérience utilisateur.

Le quatrième onglet propose une série de dilemmes interactifs, présentés sous forme de mises en situation. Ces scénarios, présentés plus en détail dans le chapitre suivant, permettent de tester les effets d’un indicateur visuel particulier présent dans le prototype sur les décisions collectives : l’indicateur stigmergique. L’application, développée en langage web, est un nouveau programme autonome utilisant sa mémoire locale du navigateur (Google Chrome) afin de ne pas rencontrer d’obstacle technique dans un contexte de réseaux locaux industriels sécurisés.

Enfin, le cinquième onglet donne accès à un dernier formulaire Microsoft Forms. Il présente à nouveau un questionnaire de type CCS, afin de mesurer l’évolution de la cognition collective après l’ensemble des expériences.

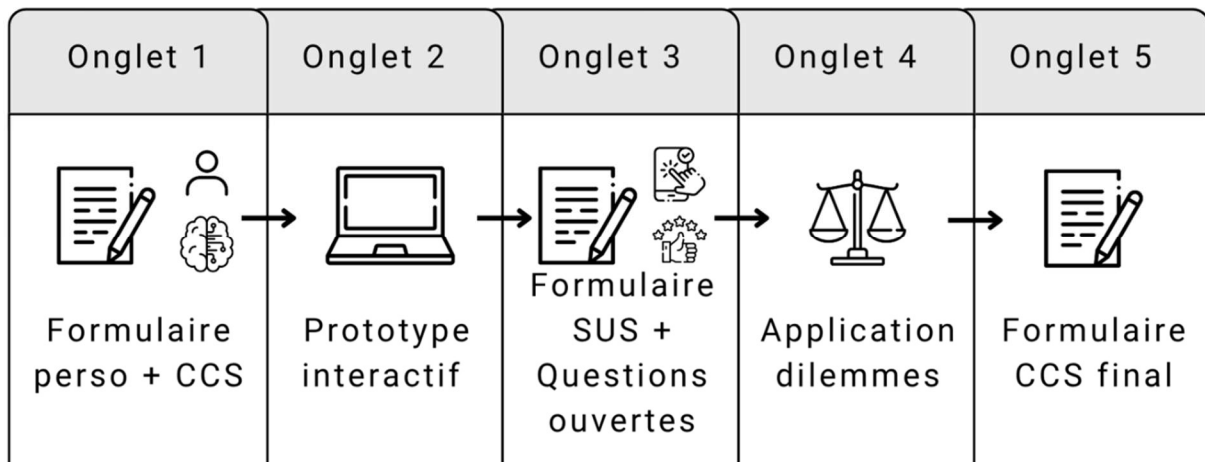


Figure 4.11 : Disposition des interfaces d’expériences par onglets.

4.2.2 Développement réalisé

La modélisation de tous les échanges nécessaires à l’aide des versions « *TO BE* » des scénarios de collaboration et le prototypage du système par la détermination des onglets structurant l’interface mènent à l’implémentation du prototype. Comme ce prototype doit simuler les interactions de l’utilisateur testé avec d’autres agents simulés, humains ou machines, il doit être réactif à ses actions. Pour cela le logiciel de prototypage Axure RP³ a été utilisé. Il permet de simuler un système en se concentrant sur son interface et son comportement réactif, sans

² Microsoft Forms est un outil gratuit d’édition de formulaires développé par Microsoft. Il permet de créer facilement des questionnaires accessibles en ligne, avec exportation automatique des réponses au format Excel. Présentation disponible sur : <https://www.microsoft.com/fr-fr/microsoft-forms>

³ Axure RP est un logiciel de prototypage développé par Axure Software Solutions, Inc. Il permet de concevoir des maquettes interactives d’interfaces utilisateur, intégrant des logiques conditionnelles, des interactions dynamiques, et des comportements simulés sans code. Plus d’informations : <https://www.axure.com>

forcément implémenter toute la partie serveur contenant par exemple les bases de données. Cela suffit en menant les expériences à l'aide de scénarios précis permettant de maîtriser la portée des aléas des décisions du sujet et leurs conséquences pour conserver un cadre limité concernant la logique métier. Un code indépendant de tout autre système est généré pour permettre au prototype de fonctionner sur l'ordinateur utilisé pour les expériences. Cela est particulièrement important pour des raisons pratiques dans un environnement industriel dont la sécurité informatique est renforcée. L'indépendance du code et du prototype est au cadre technique ce que le scénario simulé est au cadre de la logique métier. Elle constitue un garde-fou pour un environnement expérimental restreint et maîtrisé. Au-delà de la partie technique, le fait d'étudier le sujet isolément permet de respecter la vision modulaire du système modélisé. L'étude doit donc bien être initiée par l'observation d'un seul agent constituant le système multi-agents.

Les différentes phases de la boucle d'apprentissage décisionnelle constituent autant d'onglets sur l'interface finale du système SOMA pour le processus de requête traitée : définition, réponse, évaluation et résultats.

La Figure 4.12 présente le premier onglet de la définition de la requête. Il permet tous les flux de données répertoriés dans la phase de définition de requête du Tableau 4.1. Ils vont des données concernant les caractéristiques du problème à la validation des participants au processus, en passant par les suggestions que l'utilisateur peut faire lorsqu'il n'en est pas sûr, ou que l'agent médiateur peut faire également. Les agents qui demeurent dans les suggestions, sans être transférés dans la partie validée, au moment de la validation finale de la requête, ne seront pas sollicités directement mais suggérés aux agents validés et donc sollicités.

Figure 4.12 : Onglet de définition d'une requête et de l'agence participante

La Figure 4.13 présente l'onglet de réponse à une requête dans son aspect final. L'aspect final correspond à celui qui a été préparé pour les expériences, augmenté de quelques détails déduits des remarques à chaud des sujets afin de fluidifier l'expérience. Dans ce cas, des éléments de clarification du contexte et de l'objet de cet onglet comme le titre « *Proposed answers to the request* » (réponses à la requête proposées) et la légende d'en bas explicitant la signification des pastilles qui apparaissent dans l'encart « *Past choice results* » (résultats passés du choix). Cet onglet concerne les flux de données de la phase de délibération sur les options du Tableau 4.1. Il permet de proposer des options possibles en les créant et voter pour les préférences. Chaque option est représentée par un encadré, ici il n'y a qu'une option « *Boroscopic Inspection* » (Inspection endoscopique) qui correspond à une action de maintenance. Le vote de l'option se fait en cliquant sur le bouton « *Approve* » (Approuver) qui est un commutateur à glissière à mettre sur la position verte. Il s'agit d'une entrée binaire obligatoire, active sur cet exemple. L'autre manière d'évaluer l'option est la glissière bleue juste en dessous qui permet d'évaluer à l'aide d'une valeur de 0 à 100. Cette entrée est facultative car plus subtile et contraignante. Or, les contraintes obligatoires sont à réduire au maximum pour assurer l'adhésion des utilisateurs. Elle est utile en particulier si l'utilisateur vote pour plusieurs options mais veut nuancer ou donner un ordre de préférence en ajoutant une force de conviction différente sur chaque option par exemple.

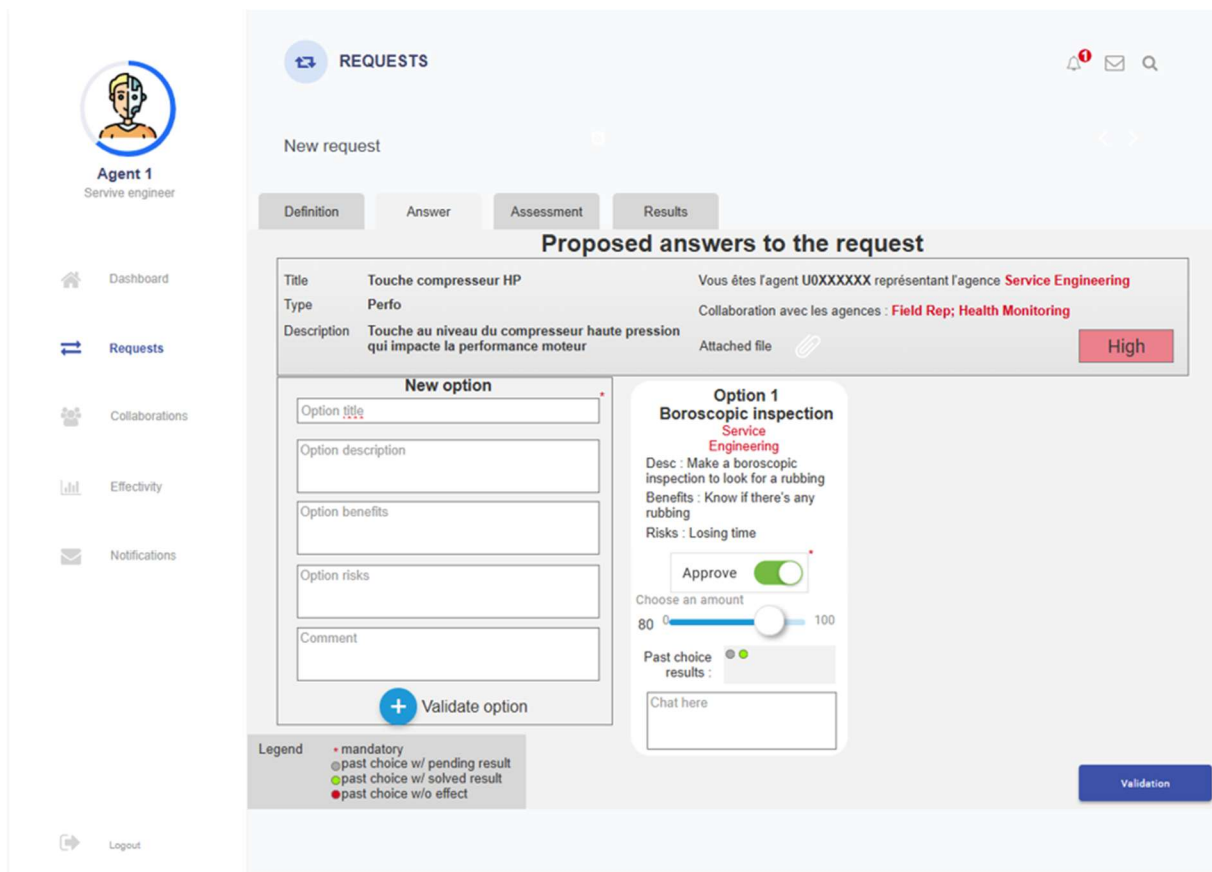


Figure 4.13 : Onglet de délibération sur les options et de réponse à une requête

La Figure 4.14 présente l'onglet d'évaluation. Les différents éléments constituant le processus décisionnel qui a eu lieu peuvent être évalués : la pertinence de la participation de chacun des autres agents et de sa propre participation. Ceci permet d'alimenter un apprentissage de meilleures suggestions futures d'experts de la part de l'agent médiateur. La bonne définition de la requête est évaluée également, ainsi que la pertinence de la réponse finale. De la même manière que pour les options de la phase précédente, il y a pour chaque élément un bouton de type commutateur. S'il est activé, une évaluation facultative sur une échelle de 0 à 100 est possible pour un retour plus fin. Enfin, le retour des conséquences de la décision, si connu, peut être signalé comme « Without effect » (Sans effet) ou « Solved » (Résolu). Sinon, la position par défaut est « Pending » (En attente). Cette évaluation permet de générer des indicateurs stigmergiques pour les successeurs dans ce type de processus décisionnel.

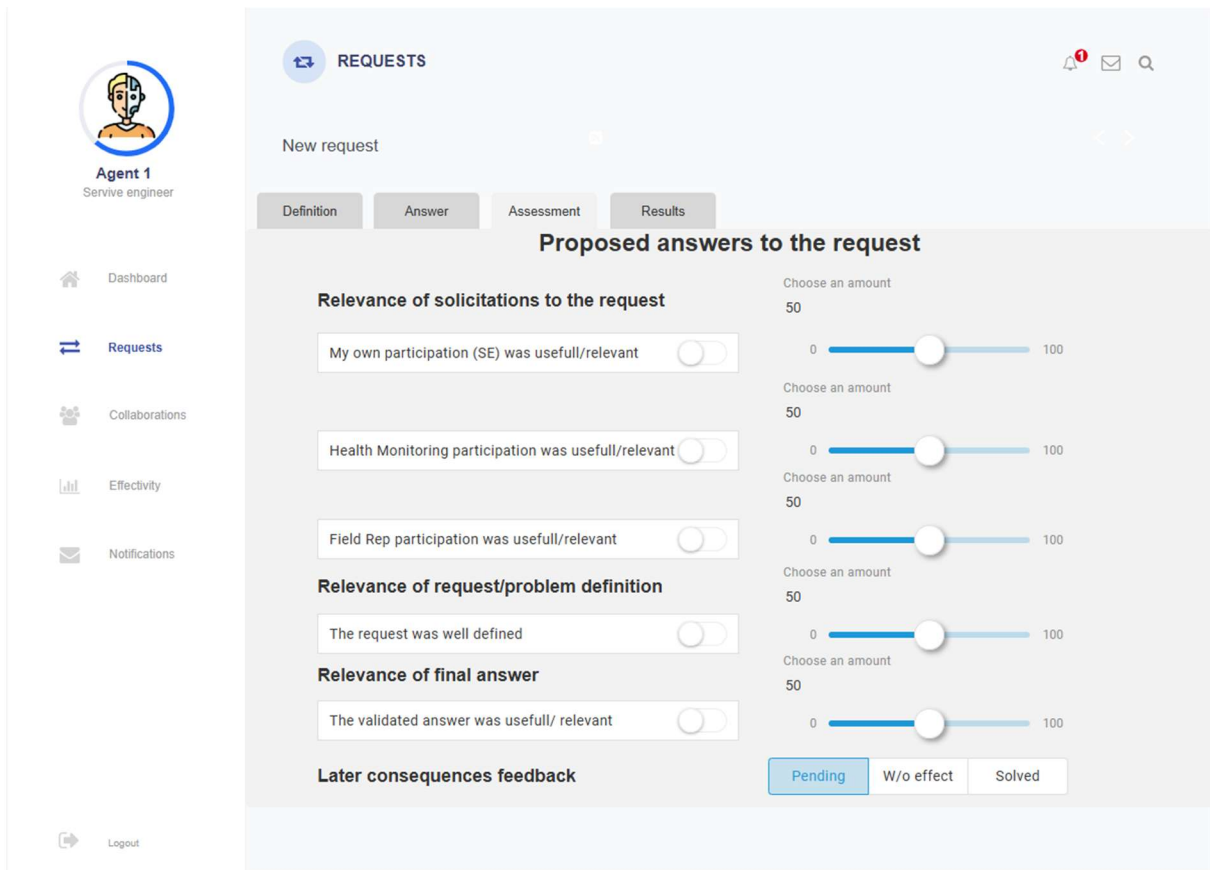


Figure 4.14 : Onglet d'évaluation des éléments de la requête et de son traitement

La Figure 4.15 correspond à l'onglet présentant les résultats consultables du processus en question. Cette partie ne contient pas d'entrée mais permet d'observer l'état de la requête en cours ou son bilan, notamment les évaluations des collaborateurs. Un enrichissement est bien sûr envisageable.

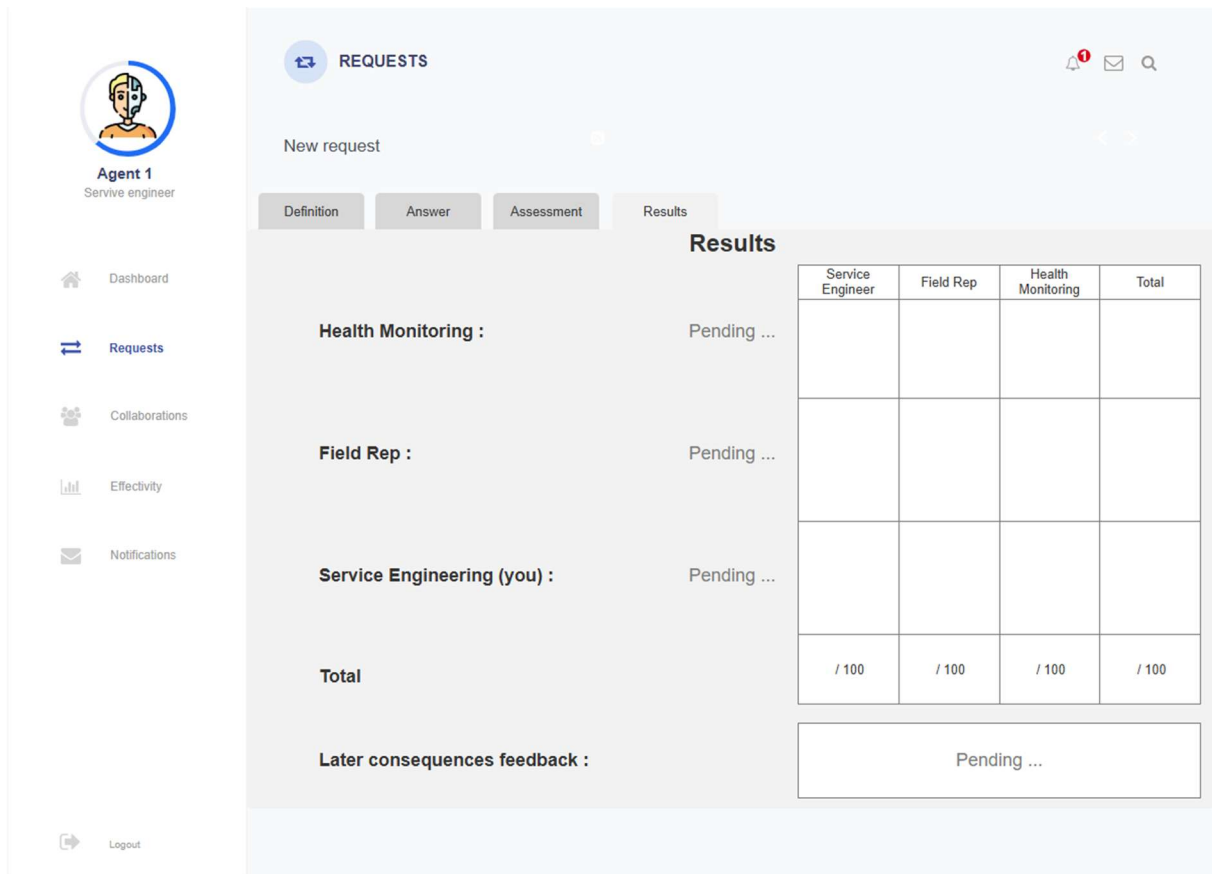


Figure 4.15 : Onglet des résultats des évaluations et du retour des conséquences de la décision pour cette requête

Autour de ce processus décisionnel, d'autres parties sont possibles, pour une vision plus globale et synthétique de la situation de l'agent dans l'organisation et son activité, des analyses plus fines des activités de collaborations et ses réseaux, ou encore d'analyses croisées des performances, par exemple par secteurs, agences, périodes. C'est ce qui a été anticipé, avec les onglets visibles sur la colonne de gauche, respectivement « *Dashboard* » (Tableau de bord), « *Collaborations* » (Collaborations) et « *Effectivity* » (Efficacité). Cependant, ces parties n'ont pas fait l'objet d'une conception poussée, les scénarios expérimentaux se concentrant sur le processus décisionnel inclus dans « *Requests* » (Requêtes).

Pour évaluer l'acceptabilité du système général ainsi que l'impact des indicateurs stigmergiques en particulier qu'il comporte (les pastilles colorées évoquées plus en détail dans la suite de cette section), divers outils d'évaluation doivent être mis en place. Certains outils existants sont adaptés à l'évaluation du prototype quant à son interface générale notamment. Cependant, d'autres ont dû être conçus spécifiquement pour l'évaluation de l'impact des indicateurs stigmergiques sur les décisions, ou pour l'impact de l'utilisation d'un tel système sur la cognition collective de l'organisation. Le détail de ces outils est présenté dans la partie suivante.

4.3 Outils d'évaluation

Un prototype a été implémenté afin de tester concrètement l'apport d'un tel système sur le terrain, en conditions réalistes. Pour analyser les résultats de ces tests lors d'expériences

impliquant de réels collaborateurs de l'entreprise, des outils sont nécessaires. Tout au long des expériences menées, ces outils d'évaluation sont déployés afin de collecter les données à traiter tant pour l'identification des sujets que pour la vérification de la bonne utilisabilité générale du système et, enfin, pour l'étude des effets des indicateurs stigmergiques sur l'intelligence collective et la qualité des décisions. L'objet de certaines évaluations est très précis et connu et des passages précis des scénarios de tests utilisateurs ou des questions précises et fermées permettent de le cibler. D'autres en revanche, sont moins précis ou connus à l'avance et des questions plus libres et ouvertes permettent de les identifier.

4.3.1 Données personnelles

Le premier type de données à collecter est celui des données personnelles. Il s'agit seulement d'identifier les utilisateurs le temps du traitement des données pour le faciliter étant donné que différentes expériences et évaluations sont effectuées par chacun. Il ne s'agit pas d'établir des résultats nominatifs au vu du contexte industriel, d'autant plus que des formulaires de consentement respectant la réglementation européenne sur les données personnelles (Voigt & Von dem Bussche, 2017) sont signés en début d'expériences. Le contenu de ces données personnelles est détaillé dans la Section 5.3.2.2 présentant le protocole de recherche. Il permet d'obtenir les données nécessaires pour s'assurer que des disparités dans les caractéristiques des utilisateurs ne faussent pas les résultats des expériences. Par exemple, la fréquence d'utilisation d'outils informatiques est vérifiée, même s'il est *a priori* probable que tous les utilisateurs en aient une utilisation quotidienne.

4.3.2 Utilisabilité

Un outil doit permettre d'étudier l'utilisabilité du système avant de passer à l'évaluation de l'impact des indicateurs stigmergiques qui sont plus spécifiques. L'utilisabilité d'un système est la mesure de son efficacité, de son efficience et de la satisfaction à lors de son utilisation pour atteindre des objectifs dans un contexte donné selon la norme ISO 9241-11 (Bevan, 2009). L'efficacité est la capacité de l'utilisateur à accomplir ses tâches avec précision et complétude. L'efficience correspond aux ressources nécessaires pour les accomplir (efforts, temps). La satisfaction est le degré de confort et de contentement ressenti lors de l'utilisation. La vérification de la bonne utilisabilité générale du système peut se faire de plusieurs manières. Des outils d'évaluations qui diffèrent par leur approche et leur longueur comme souligné dans le Tableau 4.2 existent, comme le User Experience Questionnaire (UEQ) qui permet d'évaluer l'expérience utilisateur de manière détaillée (Laugwitz et al., 2008) grâce à six échelles (attractivité, clarté, efficacité, précision, stimulation et nouveauté). Le Computer System Usability Questionnaire (CSUQ) mesure trois aspects de l'utilisabilité (satisfaction générale, qualité de l'information et qualité de l'interface) (J. R. Lewis, 1995). Ces deux tests, qui donnent une place importante à la satisfaction et la perception émotionnelle, sont intéressants pour avoir une vision détaillée de l'expérience utilisateur, car très complets. Mais le cadre de cette étude comprend plusieurs expériences et évaluations. Ils peuvent donc s'avérer trop longs et fatigants pour ce protocole. D'autres outils d'évaluation existent comme le NASA Task Load Index (NASA-TLX) qui évalue la charge cognitive de l'utilisateur lors de

l'utilisation, particulièrement adapté dans les situations complexes ou stressantes (Hart, 1988) ou l'AttrakDiff qui ajoute l'aspect de l'attrait esthétique (Hassenzahl et al., 2003). Cependant, ces tests, bien que moins longs et largement utilisés, sont indirects concernant l'utilisabilité en elle-même. En effet, le premier mesure la capacité de l'utilisateur à prendre en main le système sans être dépassé cognitivement et le second est très axé sur l'expérience émotionnelle. Un outil d'évaluation de l'utilisabilité alliant le bon ciblage de l'UEQ et du CSUQ et la légèreté du NASA-TLX et de l'AttrakDiff est le System Usability Scale (SUS) qui est un questionnaire court qui évalue l'utilisabilité d'un système de manière globale (Brooke, 1996). Il offre des résultats fiables malgré sa facilité d'utilisation et est largement adopté pour sa transposabilité. C'est ce SUS, détaillé dans la Section 5.3.2.4, qui est donc retenu dans le cadre de cette étude.

Tableau 4.2 : Synthèse des caractéristiques des outils d'évaluation de système.

Outil	Items	Axe principal	Points forts	Limites
SUS	10	Utilisabilité globale	Rapide et fiable	Peu détaillé
UEQ	26	Expérience utilisateur globale	Émotions et satisfaction	Long
CSUQ	19	Utilisabilité approfondie	Qualité de l'information	Long
NASA-TLX	6	Charge cognitive	Effort cognitif	Pas d'utilisabilité directe
AttrakDiff	28 (simples)	Qualité perçue	Esthétique et expérience	Moins axé sur l'utilisabilité

Pour donner la possibilité aux utilisateurs d'exprimer d'éventuels obstacles, frustrations ou remarques qui ne pourraient pas être captés lors de l'observation ou par le SUS, un espace d'expression plus libre est laissé à disposition à la suite du SUS. Il s'agit de questions ouvertes, présentées dans la Section 5.3.2.4. La première invite l'utilisateur à exprimer ce qu'il modifierait dans le système général, et les deux suivantes l'invitent à apporter des remarques concernant le premier scénario et le deuxième scénario respectivement.

4.3.3 Cognition collective

Le système testé est censé augmenter l'organisation par une mémoire intégrée et la coordination de ses agents et agences internes. Autrement dit, il est censé améliorer la cognition de groupe. La littérature la plus étroitement liée à l'étude de la cognition de groupe se trouve dans le domaine de la psychologie cognitive et sociale avec une proposition du concept de Système de Mémoire Transactive (SMT). Il combine les mémoires individuelles et la communication entre ces individus (Wegner, 1987). Des échelles ont été proposées pour mesurer l'efficacité de ces SMT (K. Lewis, 2003). Cependant, ce concept est plutôt centré sur l'individu et la façon dont celui-ci est augmenté *via* l'organisation établie entre les autres individus et lui, en particulier concernant la mémoire. L'individu est condamné à une grande

perte cognitive en cas de séparation de l'organisation. Le tout ne se retrouve pas dans la partie. Selon (Wegner (1987), l'idée selon laquelle le groupe, comme l'individu, est sentient et doté d'une forme de vie mentale qui lui est propre est désuète. La présente étude part du postulat que cette idée, loin d'être désuète, représente un potentiel inexploité à ce jour, dont la réalisation dépend de la mise en place d'un système. Étant donné que la cognition de groupe n'émerge pas spontanément (Bodart, 2018 ; Moscovici et al., 1992), le système étudié dans le cadre des expériences menées ici doit intégrer les conditions nécessaires à son émergence, rendues possibles par les technologies actuelles. C'est pour cela que cette étude nécessite un outil d'évaluation de cognition de groupe conçu avec une approche plus holistique et intégrée.

Des études ont également été menées concernant les Modèles Mentaux Partagés (Cannon-Bowers et al., 1993) avec des questionnaires développés pour les mesurer et comparer notamment sur les perceptions des tâches et des rôles au sein d'une équipe. Cette approche se concentre non sur le processus dynamique d'intégration des membres, mais sur une photographie instantanée des représentations individuelles. Elle souligne par ailleurs que l'harmonisation de ces représentations devient d'autant plus complexe que l'organisation est de grande envergure. Enfin des études sur le climat et la culture organisationnels existent (Schneider et al., 2013) mais elles s'avèrent plus descriptives et concernent l'environnement contextuel. Les Modèles Mentaux Partagés et le climat et la culture organisationnels abordent des facteurs influençant la cognition collective au lieu de la cognition elle-même et sa mesure directe.

Les outils actuels d'évaluation de la cognition de groupe présentent des limites importantes qui ne permettent pas de répondre aux exigences de cette étude. De plus, Dans ce contexte, il est nécessaire de repartir sur de nouvelles bases et de repenser intégralement l'approche, en s'inspirant des tests cognitifs destinés aux individus pour identifier d'éventuelles déficiences personnelles et en complétant par des aspects propres aux dynamiques collectives. Ainsi, une approche plus holistique permet de transitionner d'une étude de la cognition de groupe (addition d'individus) à une étude de la cognition collective. Cette nuance implique une approche plus intégrée et d'observation des émergences.

Cinq outils de tests cognitifs individuels ont été identifiés. Le Mini-Mental State Examination (MMSE) a été conçu pour évaluer divers domaines cognitifs comme l'orientation, la mémoire, l'attention, le langage et les compétences visuospatiales (Folstein et al., 1975). Le Montreal Cognitive Assessment (MoCA) est un autre outil largement utilisé comme le MMSE pour évaluer la mémoire, l'attention, le langage, les capacités visuospatiales et les fonctions exécutives (Nasreddine et al., 2005). Il est plus détaillé que le MMSE. Ces deux derniers comportent plusieurs sous-tests et sont les plus longs comparé aux trois suivants, qui sont généralement plus rapides à administrer, certains d'entre eux constituant même des sous-parties du MMSE ou du MoCA. Le ClockDrawing Test est un test qui évalue les fonctions visuospatiales et exécutives (Shulman, 2000). Les participants doivent dessiner une horloge présentant une heure spécifique. La qualité du dessin et l'exactitude de l'heure sont évaluées. Le Digit Span Test mesure la mémoire de travail et l'attention (Wechsler, 1997). Les participants doivent répéter des suites de chiffres dans l'ordre entendu ou en ordre inverse. Le Trailing Making Test (Reitan, 1958) évalue l'attention visuelle, la flexibilité cognitive et la

vitesse de traitement. Les participants doivent relier des cercles comportant des numéros ou des lettres dans l'ordre croissant en alternant numéros et lettres.

Les outils individuels présentés permettent d'évaluer différents aspects de la cognition, comme la mémoire ou la flexibilité cognitive. Ces aspects ont été identifiés et ont servi de base pour concevoir les items d'un outil permettant de les mesurer. Si ces tests sont passés par les individus de l'organisation, l'objet de l'évaluation est la cognition du groupe et non des individus qui le constituent. Des items supplémentaires complètent donc ce test pour couvrir les aspects propres à un groupe qui ne sont pas évalués chez l'individu, comme la collaboration et la communication entre les individus ou l'isolement des groupes d'individus. Cela peut s'apparenter à la communication entre différentes parties cérébrales chez l'individu, qui n'est pas directement évaluée. Le choix du format de cet outil d'évaluation correspond à celui du SUS afin de bénéficier de ses qualités de simplicité d'administration et sa notoriété rendant son fonctionnement facilement compréhensible. En effet, le score se calcule donc de la même manière. Étant donné que l'objet de la mesure n'est plus l'utilisabilité d'un système mais la cognition collective, cet outil est nommé Collective Cognition Scale (CCS). Voici ci-dessous ses dix items :

- 1. L'organisation conserve et rappelle les informations importantes, telles que les détails des projets, les exigences des clients ou les délais.**
- 2. L'organisation rencontre des difficultés à communiquer et partager efficacement les informations entre les membres de l'équipe ou des différents services.**
- 3. L'organisation s'engage souvent dans des processus collaboratifs de résolution de problèmes et de prise de décision.**
- 4. Il est difficile pour l'organisation de s'adapter aux circonstances changeantes et d'ajuster ses stratégies en conséquence.**
- 5. L'organisation tire souvent parti des connaissances et des expériences collectives pour améliorer la performance globale.**
- 6. L'organisation n'apprend pas des erreurs passées et n'applique pas les leçons apprises dans les projets ultérieurs.**
- 7. L'organisation encourage une culture de partage des connaissances et d'apprentissage continu.**
- 8. Les différents services ou équipes sont cloisonnés et leurs efforts devraient être mieux coordonnés et synchronisés.**
- 9. L'organisation utilise efficacement la technologie et les outils pour soutenir la mémoire et la collaboration.**
- 10. La performance globale de l'organisation en termes de mémoire, de collaboration et d'apprentissage nécessite d'être améliorée.**

La plupart des items, bien que réadaptés à un contexte groupal, sont directement inspirés des tests cognitifs individuels et vise les mêmes fonctions. Les exceptions se trouvent en particulier au niveau du deuxième et du septième qui sont propres à l'organisation. Hormis ces deux derniers items, le Tableau 4.3 les répertorie en les associant aux tests cognitifs individuels qui les ont inspirés, ainsi qu'aux fonctions cognitives ciblées par ces derniers.

Tableau 4.3 : origines d'inspirations issues de tests individuels existants pour les items du CCS.

Test individuel	Fonctions évaluées	Equivalence groupale	Items du GCS correspondant
MMSE	Orientation, mémoire, attention, langage, compétences visuospatiales.	Mémoire collective : Capacité de l'organisation à retenir des informations clés (projets, échéances). Coordination : Orientation collective vers des objectifs communs.	1, 10
MoCA	Mémoire, attention, langage, capacités visuospatiales, fonctions exécutives.	Collaboration et adaptation : Capacité à résoudre des problèmes collectifs, à s'adapter aux changements, et à exploiter les expériences passées pour évoluer.	3, 4, 5
Clock Drawing Test	Fonctions exécutives (planification, organisation), mémoire sémantique, correction d'erreurs.	Planification collective : Capacité à structurer des projets, détecter les erreurs organisationnelles et ajuster les processus.	6, 10
Digit Span Test	Mémoire de travail (capacité à retenir et manipuler une séquence d'informations), attention.	Mémoire organisationnelle active : Capacité à suivre et à intégrer simultanément plusieurs tâches ou flux d'informations dans un environnement collaboratif.	1, 9
Trail Making Test	Attention visuelle, flexibilité cognitive, vitesse de traitement.	Agilité organisationnelle : Capacité à alterner entre plusieurs tâches ou priorités et à s'adapter rapidement à des changements dans l'environnement ou les objectifs.	4, 8

Ce CCS, outil d'évaluation de cognition collective, peut être soumis à chaque participant aux expériences. Une fois avant les expériences pour obtenir son évaluation de l'organisation avant d'avoir pris connaissance du prototype, et une seconde fois après, en prenant en considération que le système serait mis en œuvre dans l'organisation. Ainsi, une comparaison entre la situation telle qu'elle est sans le système et telle qu'elle serait avec peut être faite. La sévérité d'évaluation peut différer d'un individu à l'autre, mais une moyenne des résultats de tous les participant peut être calculée pour obtenir une note globale. De plus, l'intérêt premier est la comparaison entre la première évaluation et la deuxième, la comparaison valant mieux qu'une simple valeur absolue, comme expliqué dans la Section 2.1.2, sur l'organisation apprenante, pour contrer les biais individuels dans les auto-évaluations.

Il convient de souligner que la CCS constitue une proposition originale de cette recherche. Conçue sur le modèle du SUS, elle s'appuie sur une approche synthétique par questionnaire pour évaluer la cognition collective, en transposant à l'échelle du groupe des logiques issues de tests cognitifs individuels validés.

Il ne semble pas exister à ce jour d'outil standardisé équivalent permettant une évaluation qualitative simple, rapide et structurée de la cognition collective au sein d'un groupe. Cette première application, bien qu'exploratoire, offre des résultats encourageants et permet de poser les bases d'une méthodologie reproductible.

Il serait toutefois pertinent d'approfondir ce travail par des études complémentaires visant à évaluer plus systématiquement la sensibilité, la fiabilité et la validité externe de l'outil, notamment en croisant ses résultats avec des mesures objectives de performance collective ou des observations qualitatives indépendantes. De tels travaux permettraient de comparer la CCS à d'autres indicateurs ou méthodes issus de la littérature et d'en consolider la pertinence scientifique. Cette piste fera naturellement partie des perspectives à envisager pour prolonger les apports de cette recherche.

4.3.4 Stigmergie

Un aspect important de cette recherche est l'étude de l'impact d'indicateurs stigmergiques sur la qualité du processus de décision collaborative. Cette qualité peut inclure la résolution effective d'un problème, la vitesse d'exécution du processus décisionnel collectif ainsi que sa robustesse aux erreurs qui pourraient être induites par les erreurs des pairs.

La nature et les caractéristiques des indicateurs stigmergiques doivent être déterminées. Elles peuvent s'appuyer sur l'observation des traces présentes dans la nature qui ont ensuite inspiré des recherches. Les traces stigmergiques peuvent être de plusieurs natures et impliquer divers supports et caractéristiques. Elles peuvent inclure des signaux visuels, olfactifs et tactiles. Elles peuvent présenter des caractéristiques incluant la modalité (visuelle, olfactive ...), la durabilité (permanente ou temporaire) et l'intensité (force du signal) (Heylighen, 2016).

Par exemple, les fourmis déposent des traces olfactives composées de phéromones. Les caractéristiques de ces traces sont l'aspect temporaire car ces phéromones sont volatiles et donc s'évaporent, ainsi qu'une variabilité de la concentration (Theraulaz & Bonabeau, 1999).

Au sein des interactions humaines via les technologies actuelles, cela peut prendre la forme de traces symboliques et numériques comme des annotations sur des documents partagés (Elliott, 2006) qui peuvent être visuelles et verbales avec pour caractéristiques importantes la durabilité et la clarté. Cet exemple d'annotations de documents rappelle le symbolisme du cognitivisme. Dans les applications d'ordre connexionniste, il peut s'agir de traces numériques correspondant à des états mémorisés de réseaux de neurones, avec pour caractéristiques la durabilité et la capacité à être stockées et récupérées (Galatolo et al., 2019). Au sein d'un système multi-agents (SMA) numérique et simulé, ces traces numériques ont pour

caractéristiques cruciales la mise à jour en temps réel et la clarté des informations transmises entre les agents (Xu et al., 2021). Il s'agit ici de valeurs numériques permettant l'apprentissage des agents afin d'améliorer leurs performances par un apprentissage par renforcement.

La présente étude a pour objet l'expérimentation d'un système d'aide à la prise de décision collaborative dans un système sociotechnique avec des humains. Pour ce faire, la vision de ce système sociotechnique comme étant un SMA a été adoptée afin de déterminer les besoins nécessaires à une amélioration de la cognition collective. Le processus décisionnel se base sur le processus de prise de décision partagée précédemment présenté, qui a été développé dans le milieu médical. Mais il doit non seulement coordonner les agents dans un processus décisionnel à un instant précis mais également lier ces multiples processus au cours du temps pour permettre un apprentissage ainsi qu'une coordination asynchrone des agents dont les disponibilités ne coïncident pas toujours.

Pour que le SMA obtenu à l'intégration du système soit le plus flexible et adaptable à des activités et contextes variés, la nature des indicateurs stigmergiques doit être du niveau le plus élémentaire possible. En effet, à l'instar du réseau de neurones ou du SMA simulé précédemment évoqués, des données de bas niveau permettent transformations et transpositions. Comme les indicateurs stigmergiques ont vocation à être interprétés notamment par des humains, ils doivent prendre une forme visible simple, du moins pour les expériences menées dans cette étude. La forme adoptée est donc celle de pastilles colorées.

Un indicateur binaire avec une pastille verte pour une décision qui a été concluante et rouge pour une décision non concluante ne peut malheureusement pas appréhender la complexité des situations réelles qui comportent de nombreux cas indéterminés. Ces décisions dont les conséquences ne sont pas connues peuvent s'expliquer par un temps nécessaire à l'obtention d'un retour, ou l'absence de retour étant donné que l'absence de problème et donc de besoin donne souvent lieu à une absence de communication. L'indicateur conçu est donc de nature ternaire. Trois modalités sont possibles : une pastille verte symbolisant un retour positif, une pastille rouge symbolisant un retour négatif et une pastille grise symbolisant une absence de retour. Cette dernière a pour utilité d'avoir conscience qu'un certain choix a été fait, même si les conséquences de ce choix ne sont pas connues ou n'ont pas été communiquées.

L'aspect permanent ou temporaire des traces évoqué par Elliot et par Galatolo, Cimino et Vaglini est à prendre en compte. La permanence des traces permet d'assurer une continuité et une cohérence mais peut conduire à une surcharge d'informations. Des traces plus temporaires permettent de maintenir une flexibilité, mais des traces trop temporaires peuvent entraîner une perte trop rapide d'informations cruciales. Concernant les indicateurs utilisés pour les expériences, leur persistance plus ou moins importante peut donc avoir un impact sur la cognition collective. Des tests peuvent être menés sur des séries d'itérations. La persistance de l'indicateur stigmergiques ne doit pas être mesurée en fonction du temps chronologique, mais selon un temps synthétique, où les unités de temps correspondent aux itérations d'utilisation du système, car l'intervalle temporel entre ces itérations peut être très variable selon les contextes d'utilisation.

4.4 Synthèse

Le modèle de système d'aide à la prise de décision collaborative est implémenté sous forme d'un prototype opérationnel à des fins d'expériences utilisateurs. De plus, des outils d'évaluation sont également implémentés pour accompagner ce prototype et être intégrés dans les expériences menées, qu'ils soient automatisés pour collecter directement des données issues des actions des utilisateurs (comme le programme des dilemmes pour tester les indicateurs stigmergiques) ou que ce soit à travers des questionnaires. En effet, trois éléments principaux sont évalués : l'utilisabilité du système, puis l'impact plus précisément des indicateurs stigmergiques en les isolant dans l'expérience des dilemmes, et enfin, la cognition collective. A l'instar d'un système de perception tel que la vision évoquée dans ce chapitre, un traitement interne de l'information doit être mis en œuvre pour une meilleure efficacité quant à la sélection des objets dignes d'attention, leur recherche et leur reconnaissance par exemple. Pour assurer le bon fonctionnement et l'amélioration continue d'un tel système, l'information doit même, a priori, être majoritairement d'origine interne. La possibilité de mettre en œuvre cette information déjà intégrée en la recombinaison de manière adaptée, est la condition visée par le prototype et son utilisabilité. Dans ces conditions, à un niveau plus détaillé, un dispositif doit permettre un apprentissage par renforcement au fil des itérations. C'est dans ce but que les indicateurs stigmergiques sont mis en place. Ils sont testés qualitativement dans les scénarios du prototype général qui permettent de valider leur bonne compréhension, et quantitativement dans l'expérience des dilemmes qui permet de mesurer leur impact. En parallèle de ces expériences directes, la CCS permet une réflexivité plus macro de l'amélioration de la cognition collective à la suite de l'utilisation du système, en mesurant cette cognition à travers la conscience de situation des agents du groupe et les différences de résultats *AS IS / TO BE* à la CCS. L'obtention du prototype et de ces divers outils d'évaluation permettent de mener les expériences dont le protocole, les mesures et les résultats sont détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre 5 Application : tests et validation

Ce chapitre présente le déroulement des expériences et les résultats obtenus. L'identification des besoins de conditions nécessaires pour faciliter la cognition collective a été permise par l'étude du terrain, accompagnée d'une étude bibliographique. Des modélisations ont été élaborées, tant pour déterminer le prototype censé répondre à ces besoins que l'approche dans l'observation de l'organisation pour concevoir au mieux le prototype. Ces modèles ont permis de mieux distinguer les éléments présents et manquants dans l'organisation. À la suite de ces études, modélisations et observations, une implémentation du prototype, d'une expérience annexe pour tester les indicateurs stigmergiques et des outils d'évaluation a pu être menée. Le présent chapitre présente une étape cruciale : les expériences qui consistent à tester et évaluer l'intégration du système modélisé dans les pratiques sur le terrain. De ce fait, le prototype de Jumeau Numérique (JN) est conçu autour d'un triple anthropocentrisme : il prend en compte et intègre l'humain dans sa conception, sa finalité et sa structure.

5.1 Méthodologie pour l'expérimentation

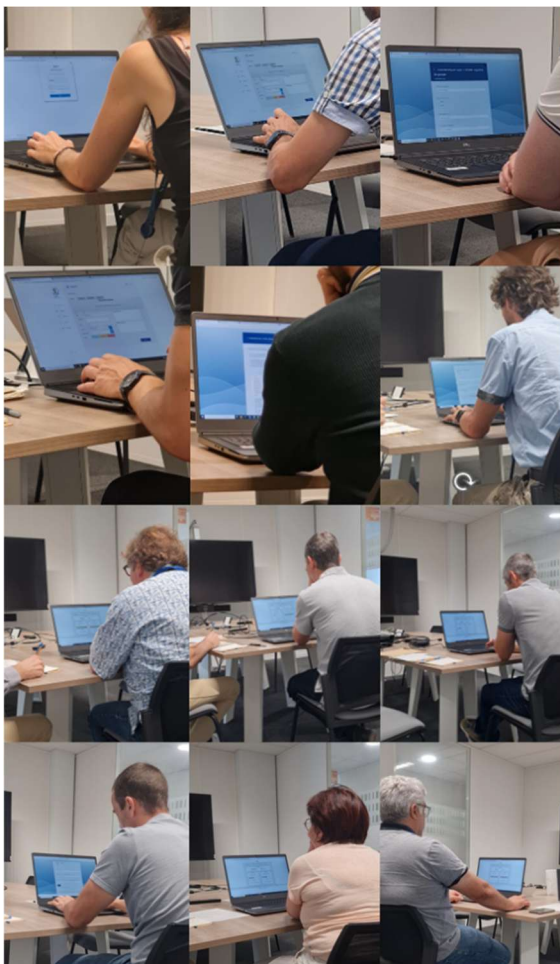


Figure 5.1 : Experts en cours de participation aux sessions expérimentales

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les outils développés visent à expérimenter le jumeau numérique conçu comme un système d'aide à la décision collaborative (cf. Section 3.3.1.2) et l'évaluer, ainsi que son impact, suivant une approche d'Intégration Humain-Système (HSI). Plus précisément, une Conception Centrée Utilisateur (CCU) est menée par des tests utilisateurs lors desquels les utilisateurs sont directement observés comme le montre la Figure 5.1. Ces utilisateurs remplissent également des questionnaires. Le nombre total d'utilisateurs impacte la fiabilité des résultats des expériences. Des études quantitatives avec un seuil de significativité (α) de 0,05 (confiance à 95%) nécessitent usuellement au moins 30 utilisateurs, bien que parfois moins si les variables ne sont pas excessivement biaisées (Randahl, 2024). Mais il s'agit plutôt, pour les tests utilisateurs du prototype par des experts, d'une étude qualitative qui nécessite un nombre moins important. En effet, ce type de tests utilisateurs nécessite peu d'utilisateurs pour arriver à saturation concernant le repérage des potentiels

problèmes : en moyenne 4 utilisateurs pour trouver 79% des problèmes et 5 utilisateurs pour 89% (Nielsen & Landauer, 1993). Cela rend possible des expérimentations rigoureuses malgré

la disponibilité limitée des experts concernés sur le terrain d'étude industriel. Une quinzaine d'experts a pu participer aux expériences, ce qui permet raisonnablement d'envisager des résultats exploitables, tout en gardant à l'esprit que les conclusions devront être interprétées avec prudence, notamment du point de vue quantitatif. Les explorations quantitatives quant à elles, notamment concernant l'étude des indicateurs stigmergiques, reposent sur un nombre important de mises en situations auxquelles les participants sont soumis, décrites en détail dans les sections suivantes.

Pour pouvoir mener une étude sur le bon fonctionnement du prototype et son impact dans l'organisation, un cadre doit être défini. Il doit être assez large pour inclure des scénarios plausibles mais assez restreint pour pouvoir être étudié convenablement en limitant le champ des possibles afin d'isoler et maîtriser un ensemble de mesures.

Bien qu'à terme le système d'aide à la décision collaborative ait pour vocation d'intégrer n'importe quel métier pour résoudre n'importe quel type de problème, un cadre d'expérimentation est donc défini pour tester le prototype. Ce cadre simule des problèmes concernant le domaine du support, avec pour métiers concernés les domaines des Field Representatives (FR), des Service Engineer SE et du Health Monitoring (HM) expliqués dans le Chapitre 3. Les expériences, pour tester le prototype, consistent à faire passer des tests utilisateurs à des SE et des HM et à leur demander de compléter de questionnaires informatiques. L'homogénéité des utilisateurs serait idéale, et l'absence de disparité trop importante doit être vérifiées, ne serait-ce que concernant une utilisation fréquente d'outils informatiques. Cependant, l'appartenance des utilisateurs à deux métiers différents est nécessaire car elle permet de vérifier la transposabilité du système.

5.2 Cadre des expérimentations

5.2.1 Évaluation de l'interface du système d'aide à la décision

L'interface conçue, dont des exemples sont visibles dans les Figure 5.2 et Figure 5.3, est évaluée grâce à des tests utilisateurs passés par les HM et les SE, sur la base d'un premier scénario à suivre simulant la création d'un problème (request) à l'initiative de la personne testée puis d'un deuxième scénario simulant la participation à un problème initié par un tiers à la suite de la réception d'une notification. Ces tests utilisateurs ont pour but l'amélioration itérative de l'interface tant dans le fond de son contenu que dans sa forme, et ce, tous les 5 tests utilisateurs. Pour cela les remarques et les difficultés éprouvées sont notées, et l'ensemble des expériences est filmé.

De plus, des questions, permettant aux utilisateurs de donner leur avis, sont présentes dans le questionnaire d'évaluation de l'interface qui fait suite à ce test. Ce questionnaire contient également un SUS (System Usability Scale) qui est une évaluation de l'utilisabilité (Gronier & Baudet, 2021 ; Volz & Gazzaniga, 2017). Cette évaluation permet d'obtenir une note sur 100. Plus elle est proche de 100, meilleure est l'utilisabilité du système.

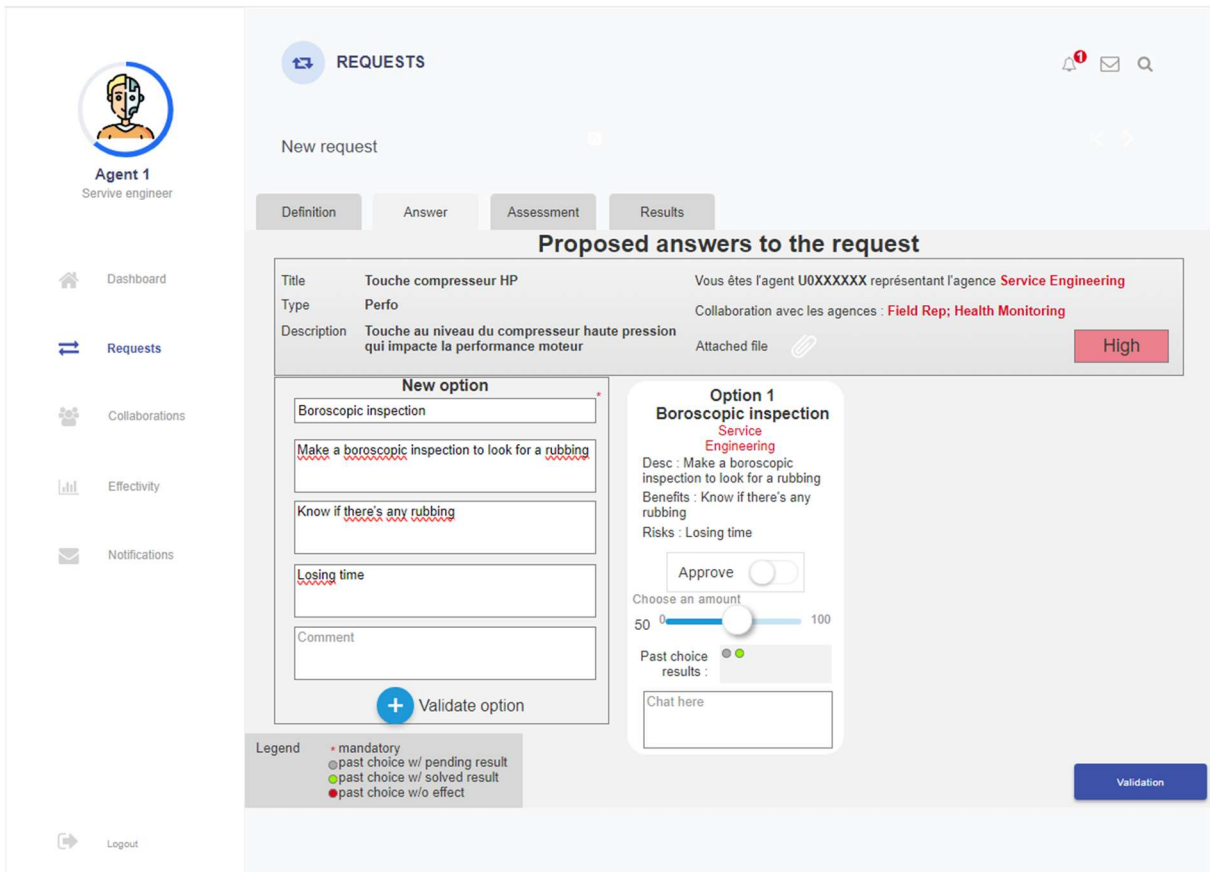


Figure 5.2 : Exemple 1 de l'aspect général des interfaces du système SOMA

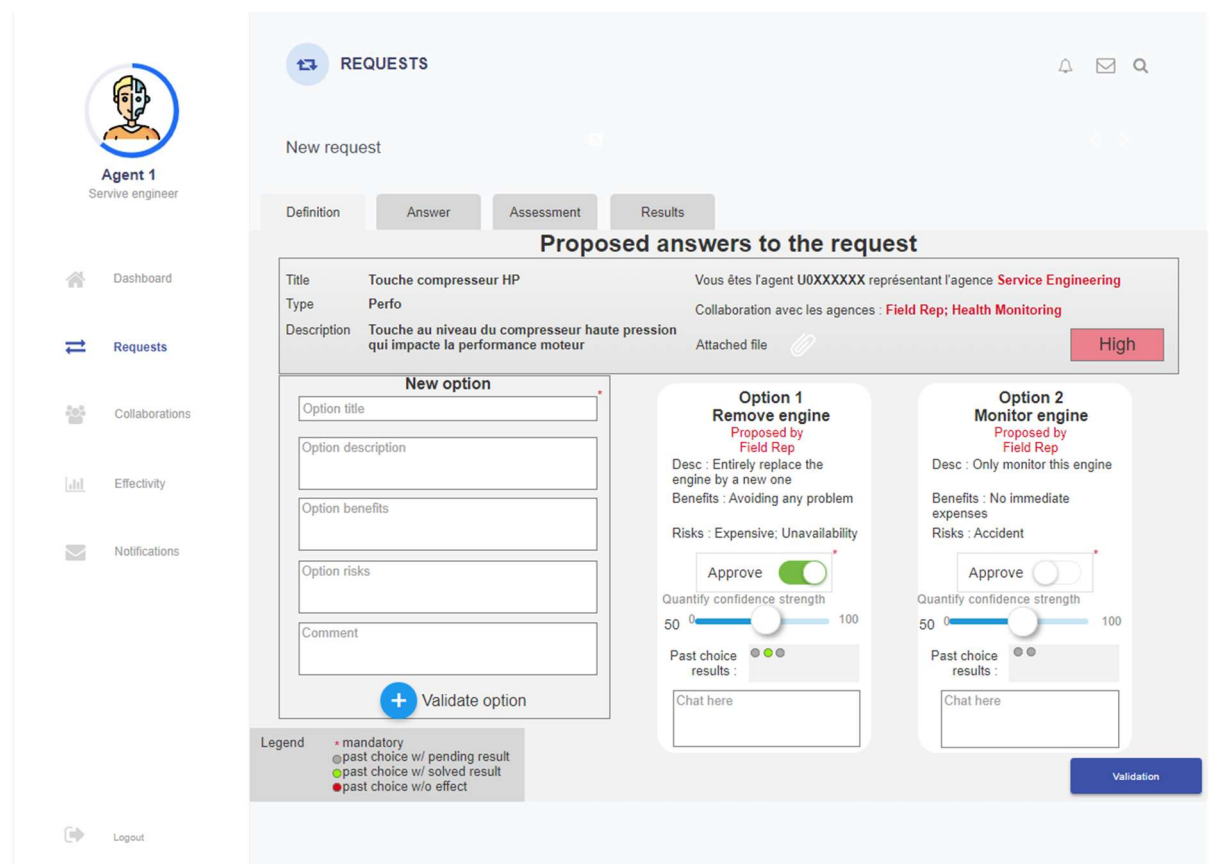


Figure 5.3 : Exemple 2 de l'aspect général des interfaces du système SOMA

5.2.2 Évaluation de l'effet d'un indicateur stigmergique

Comme évoqué précédemment (Section 2.4.4.4), la stigmergie, inspirée de la biologie, est un mécanisme de coordination indirecte entre les agents. Une action initiale laisse une trace dans l'environnement pour stimuler une action suivante, par le même agent ou un agent différent. En l'occurrence, il s'agit sur l'interface de pastilles vertes, rouges ou grises, comme présentées sur la Figure 5.4.

Pour ces pastilles, ici présentes sur les options, trois couleurs sont possibles :

- Les **vertes** indiquent que le choix de l'option en question a mené à un résultat **satisfaisant** par le passé ;
- Les **rouges** indiquent que le choix de l'option en question a mené à un résultat **insatisfaisant** par le passé ;
- Les **grises** indiquent que le choix de l'option en question a mené à un résultat qui est **inconnu**.

Ces pastilles sont supposées aider, mais leurs effets ne sont, en réalité, ni connus ni prouvés. Une expérience concerne donc précisément cet indicateur stigmergique. Elle vise à étudier les comportements, souhaitables ou non, qu'elles peuvent engendrer. Les personnes testées sont mises en situations de dilemmes tels que dans la Figure 5.5 avec plus ou moins d'informations contextuelles disponibles, dont ces indicateurs stigmergiques, et doivent choisir une des deux options disponibles.

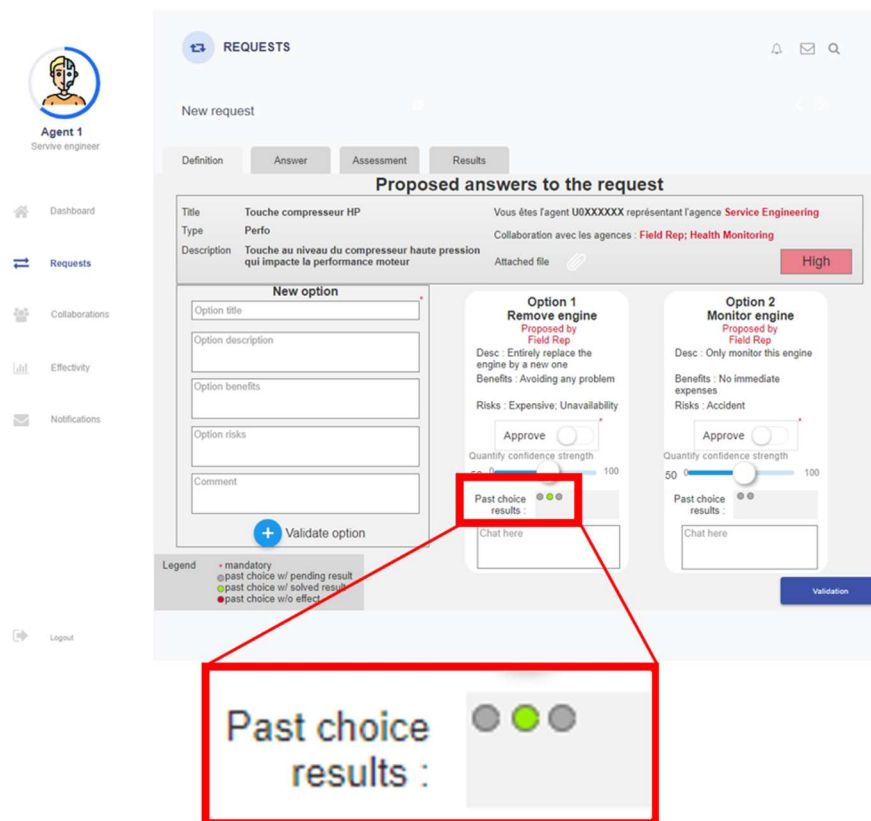


Figure 5.4 : Indicateurs stigmergiques résultants des expériences passées

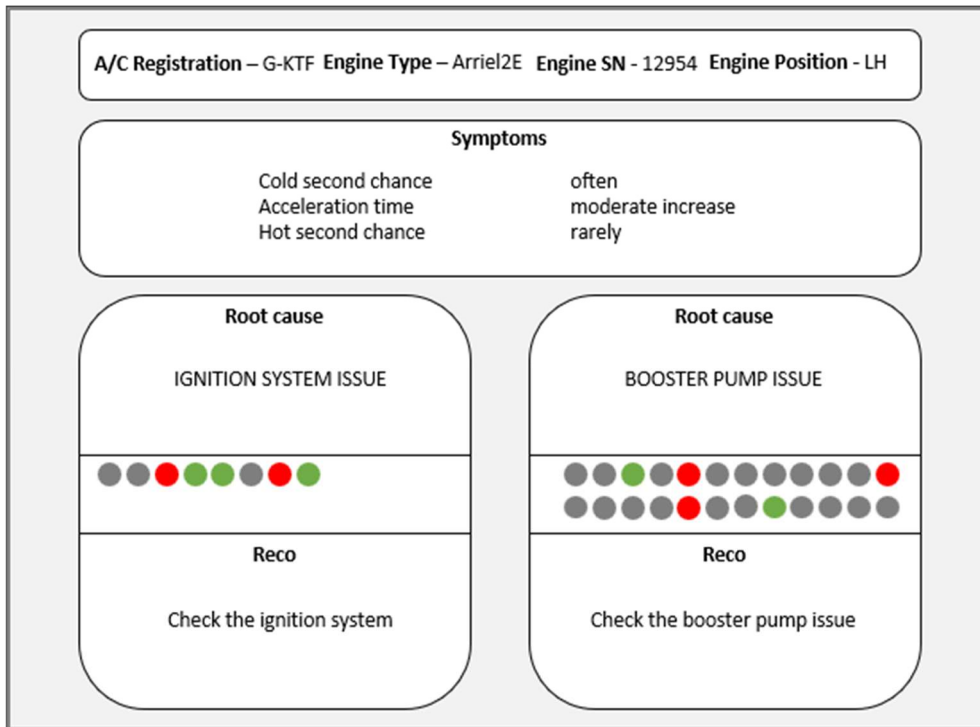


Figure 5.5 : Choix entre des options volontairement équivalentes en coût et probabilité hors indicateurs stigmergiques

5.2.3 Évaluation de l'amélioration de la cognition collective

L'outil permet d'aider les décisions non seulement individuelles mais collaboratives. Un questionnaire, inspiré du System Usability Scale (SUS) mais adapté à l'évaluation de la cognition collective, a été conçu : le Collective Cognition Scale (CCS) (Section 4.3.3). Au lieu d'obtenir une évaluation de l'interface auprès de l'utilisateur comme avec un test de type SUS, la CCS permet d'évaluer la cognition collective (mémoire, collaboration pour la résolution de problèmes etc.) en le soumettant à l'utilisateur avant de tester le prototype, puis après. Une évolution peut être observée en comparant les notes avant et après la projection d'une intégration de l'outil.

5.3 Mise en œuvre des expérimentations

Les expériences, collectes de données et analyses statistiques ont des objectifs qui représentent des apports assurés par le cadre de modélisation proposé. Ces objectifs se décomposent en plusieurs hypothèses à valider, qui représentent des sous-objectifs. Cette décomposition permet d'organiser et de préciser ce qui est évalué. Cette compartimentation aide à objectiver au mieux les conclusions grâce aux résultats qui visent à confirmer ou infirmer chaque hypothèse.

5.3.1 Objectifs poursuivis

Le premier objectif opérationnel concerne l'efficacité globale du système dans sa finalité. Le second objectif se concentre sur l'exploration d'un aspect potentiellement utile pour aider ce système dans sa mission d'amélioration de l'intelligence collective.

Objectif 1 : Le système d'aide à la prise de décision collaborative proposé aide-t-il dans un contexte de maintenance des moteurs d'hélicoptère ?

Le premier objectif est d'ordre général. Il s'agit de vérifier que le système peut effectivement faciliter et améliorer la prise de décision collaborative dans le contexte spécifique du terrain d'étude.

SO1 : Le système général a une bonne utilisabilité.

L'utilisabilité (l'atteinte des objectifs fixés avec efficacité, efficience et satisfaction) constitue le premier sous-objectif puisqu'elle est une condition initiale requise pour valider le système mais aussi pour tester l'ensemble des éléments suivants. Elle est maximisée notamment par l'ergonomie et par l'ancrage dans la réalité métier du terrain (langage et représentations) qui évitent un coût d'apprentissage trop important.

SO2 : La cognition collective est améliorée avec l'utilisation de ce système.

À la suite du premier qui représente le moyen, ce deuxième sous-objectif représente la fin : l'amélioration de la cognition collective qui peut être évaluée par l'outil de mesure prévu à cet effet.

Objectif 2 : Un indicateur stigmergique peut-il améliorer l'intelligence collective en guidant vers les bonnes décisions ?

Après un premier objectif visant à établir le cadre général de facilitation de la collaboration décisionnelle et son évaluation, ce second objectif concerne l'apport potentiel d'un élément en particulier : l'indicateur stigmergique.

SO3 : Les indicateurs stigmergiques aident à transmettre de l'information issue de l'expérience.

L'expérience doit être intégrée, par opposition à l'accumulation informationnelle. Les indicateurs stigmergiques peuvent favoriser cela en traduisant des événements passés en information augmentant les éléments d'aide à la décision lors du processus collaboratif guidé par SOMA.

SO4 : Le choix est influencé par la couleur, proportion de couleur, quantité totale, quantité relative des indicateurs stigmergiques.

Il s'agit ici d'analyser plus en détail la façon dont les différentes caractéristiques de ces indicateurs influencent le choix effectué par l'utilisateur parmi des options possibles lors d'une décision.

SO5 : Le temps de décision est influencé par la couleur, proportion de couleur, quantité totale, quantité relative des indicateurs stigmergiques.

À la suite de l'analyse de l'influence sur le choix, il s'agit ici d'analyser l'impact sur le temps de décision des différentes caractéristiques des indicateurs.

SO6 : La juste persistance des indicateurs stigmergiques permet de rendre leur influence sur les décisions robuste aux erreurs.

Ce sous-objectif à atteindre se base sur l'hypothèse selon laquelle les itérations du processus décisionnel doivent générer des indicateurs stigmergiques qui persistent durant un certain nombre d'itérations successives, et qu'il existe un nombre optimal pour rendre l'organisation non seulement apprenante mais également robuste aux erreurs. Il s'agit donc de tester expérimentalement le niveau de réadaptation suite à une erreur selon différents niveaux de persistance.

5.3.2 Protocole mis en place

Le protocole auquel chaque sujet est soumis est identique pour éviter tout biais. Cette partie décrit ses étapes.

5.3.2.1 Installation / environnement

Les expériences prennent place dans un bureau fermé, comme présenté sur la Figure 5.6, avec un ordinateur spécialement préparé à cet effet. Le sujet est seulement en présence de l'examineur, tous deux sur une chaise l'une à côté de l'autre. Une caméra est placée derrière lui sur un trépied de telle sorte qu'elle puisse filmer l'écran d'ordinateur et enregistrer la conversation.

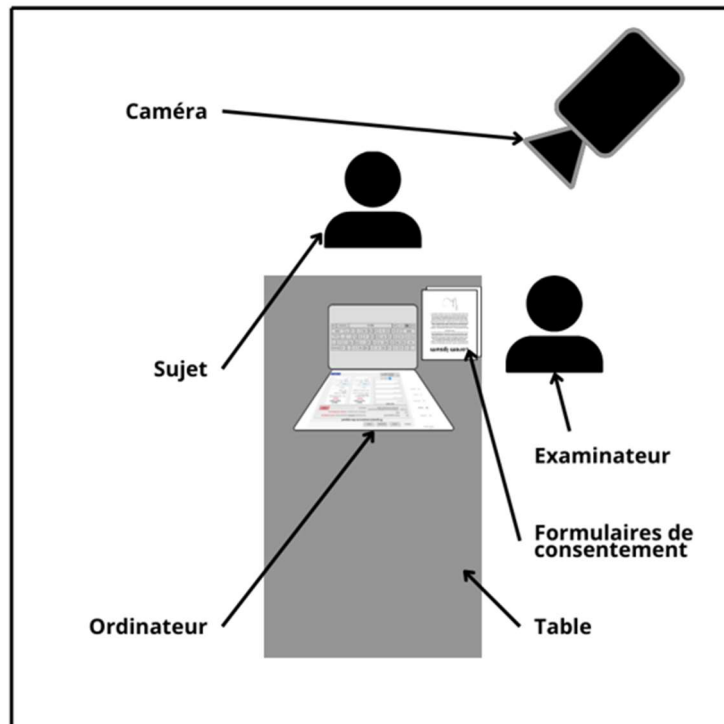


Figure 5.6 : Environnement expérimental

Avant toute chose, un formulaire de consentement éclairé en accord avec la réglementation européenne (voir Annexe B : Le formulaire de consentement) est signé en deux exemplaires par le sujet sous format papier. Un est destiné au sujet lui-même et l'autre à l'examineur. Il explique brièvement de l'objet de l'expérimentation/étude et précise que le sujet peut se retirer à tout moment s'il le souhaite. La participation à cette étude ne comporte pas de risque connu mais ce formulaire concerne principalement le traitement des données (enregistrement et exploitation audio, vidéo et de photographies) et permet d'activer la caméra à la suite de sa signature. Un résumé synthétique de l'objet de l'étude est annoncé : un outil d'aide à la décision collaborative pour des résolutions de problème simulés dans un contexte de support. Il est précisé que ce n'est pas le sujet qui est évalué mais bien le système d'aide à la décision. La caméra est activée.

5.3.2.2 Questionnaires - session 1

Lors de cette première session de questionnaires, deux premiers questionnaires sont soumis au sujet sur l'ordinateur à l'aide de Microsoft Forms. Le premier concerne les données personnelles, permettant d'identifier le type de population testée (voir Annexe C : Caractéristiques du sujet (1^{er} questionnaire)). Il concerne :

- Le prénom ;
- Le sexe ;
- L'âge ;
- Le poste occupé ;
- Le service ;

- La fréquence d'utilisation d'un outil informatique.

Le deuxième est une évaluation sur une échelle de cognition collective (CCS) présentée dans la Section 4.3.3 (voir Annexe D : Échelle de cognition collective (1^{er} et 3^{ème} questionnaires)) et personnalisée pour l'entreprise étudiée. Ce document est également soumis sur l'ordinateur, via Microsoft Forms à la suite du questionnaire précédent. Il est conçu sur le même modèle que l'échelle d'utilisabilité de système (SUS). Il a pour but de mesurer le niveau de maturité d'intelligence collective. Il comprend dix affirmations concernant celle-ci, que le sujet doit évaluer sur une échelle de 1 à 5. 1 est la plus petite note et signifie que le sujet n'est pas du tout d'accord avec l'affirmation, et 5 est la plus grande et signifie que le sujet est tout à fait d'accord avec l'affirmation. Le résultat donnera une note de 0 à 100, 100 étant la meilleure note. Le mode de calcul est détaillé dans la partie d'analyse.

Les dix affirmations à évaluer sont les suivantes :

- 1. SHE conserve et rappelle les informations importantes, telles que les détails des projets, les exigences des clients ou les délais.**
- 2. SHE rencontre des difficultés à communiquer et partager efficacement les informations entre les membres de l'équipe ou des différents services.**
- 3. SHE s'engage souvent dans des processus collaboratifs de résolution de problèmes et de prise de décision.**
- 4. Il est difficile pour SHE de s'adapter aux circonstances changeantes et d'ajuster ses stratégies en conséquence.**
- 5. SHE tire souvent parti des connaissances et des expériences collectives pour améliorer la performance globale.**
- 6. SHE n'apprend pas des erreurs passées et n'applique pas les leçons apprises dans les projets ultérieurs.**
- 7. SHE encourage une culture de partage des connaissances et d'apprentissage continu.**
- 8. Les différents services ou équipes sont cloisonnés et leurs efforts devraient être mieux coordonnés et synchronisés.**
- 9. SHE utilise efficacement la technologie et les outils pour soutenir la mémoire et la collaboration.**
- 10. La performance globale de SHE en termes de mémoire, de collaboration et d'apprentissage nécessite d'être améliorée.**

5.3.2.3 Tests utilisateurs d'interface

L'interface du système est évaluée grâce à des tests utilisateurs. C'est cette phase qui succède à la première session de questionnaires. Pour mener à bien ces tests et valider l'utilisabilité de l'interface, voire de l'améliorer de manière itérative, deux scénarios ont été élaborés pour simuler des problèmes nécessitant une prise de décision collaborative via le système. Un scénario énoncé par l'examineur permet de prêter des intentions au sujet dans une situation fictive (« L'événement X a lieu, vous voulez accomplir l'action Y »). Cela permet d'observer directement la manière donc le sujet mène à bien ou essaye de mener à bien l'action souhaitée. Ces actions, hésitations ou remarques à chaud permettent d'étudier le caractère

intuitif ou non des éléments de l'outil. Les indications énoncées par l'examineur sont les mêmes pour tous les sujets pour éviter les biais. Elles peuvent donc être répétées mais ne peuvent pas varier. Les sections suivantes décrivent en détails les indications énoncées.

5.3.2.3.1 Scénario 1 – création de requête

Ce premier scénario correspond à la création d'une nouvelle requête par l'utilisateur.

- « **Connectez-vous. L'interface étant simulée, n'importe quel mot de passe fonctionnera.** »

Il est présenté à l'utilisateur une interface classique de connexion (Figure 5.7) avec des champs pour l'identifiant, le mot de passe et un bouton de validation. L'identification de l'utilisateur est nécessaire puisqu'il s'agit d'un outil permettant de collecter des données et aiguiller vers la mise en relation avec les bons experts en fonction du problème abordé.

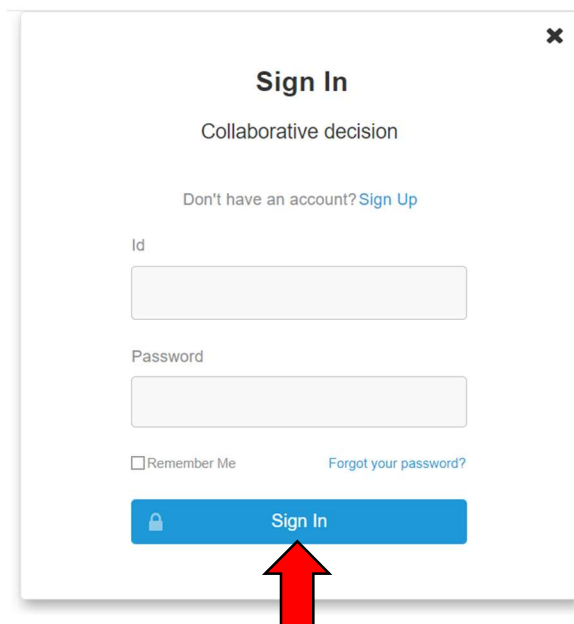
The image shows a 'Sign In' modal window. At the top, it says 'Sign In' and 'Collaborative decision'. Below that is a link: 'Don't have an account? Sign Up'. There are two input fields: 'Id' and 'Password'. Below the 'Password' field is a checkbox for 'Remember Me' and a link for 'Forgot your password?'. At the bottom is a blue button with a lock icon and the text 'Sign In'. A red arrow points upwards to the 'Sign In' button.

Figure 5.7 : Interface de connexion

- « **Ajoutez une nouvelle « request » annonçant un soupçon de touche compresseur haute pression à partager avec le service, ou agence, Health Monitoring. Cette « request » sera de priorité élevée.** »

L'utilisateur arrive sur le « dashboard » (Figure 5.8), une page d'accueil qui a pour but de résumer les informations générales. Il est attendu de cliquer dans un premier temps sur l'onglet « Request » qui mène à l'interface dédiée à la visualisation ou la création des requêtes. C'est ainsi que sont nommées les résolutions de problème. Il s'agit d'un nom assez générique pour pouvoir correspondre à n'importe quel type de question qui se pose. Dans ces tests utilisateur, il s'agit d'un contexte de support, mais à terme, n'importe quel domaine doit pouvoir être intégré.

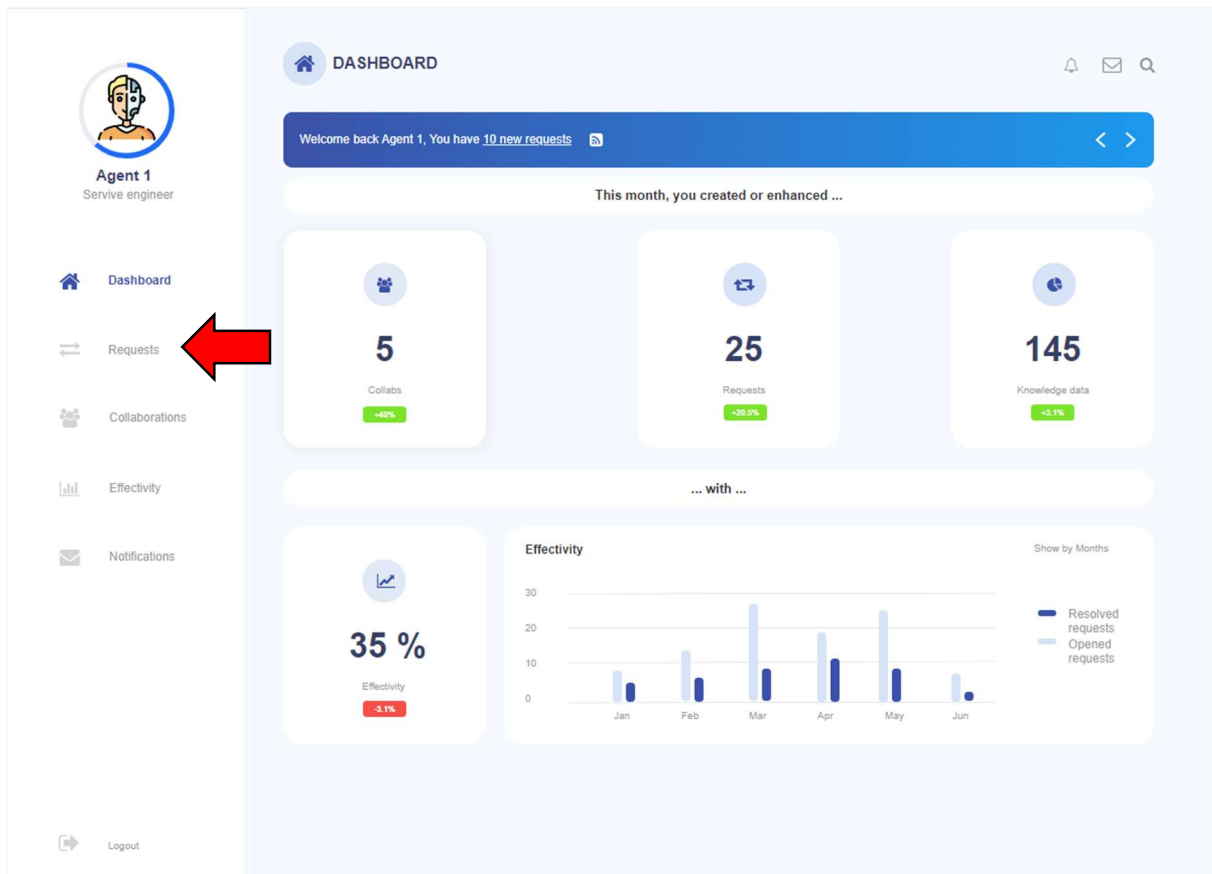


Figure 5.8 : Accès à l'onglet des requêtes depuis le tableau de bord

Dans cet onglet (Figure 5.9), les cas passés ou en cours sont visibles. Pour créer une nouvelle requête, il faut cliquer sur le bouton « *Create request* ».

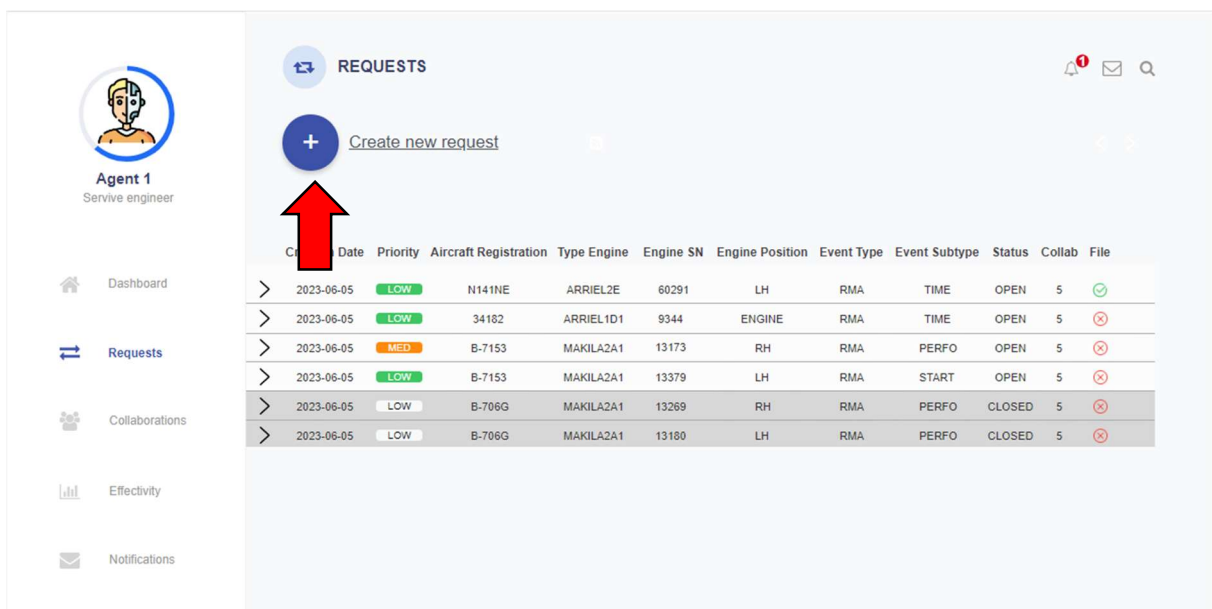


Figure 5.9 : Bouton de création d'une nouvelle requête dans l'onglet des requêtes

Ce bouton mène à l'interface de création de la requête. Elle est elle-même constituée de quatre onglets. Le premier (Figure 5.10) contient les champs nécessaires à sa définition : titre, description, type de problème, agence (nom générique pour le groupe de personnes que

l'utilisateur veut solliciter, ici des services), éventuelle pièce jointe et niveau de priorité. Ici il est attendu de cliquer sur le « + » pour ajouter le Health Monitoring comme demandé, et sur « High » pour définir un niveau de priorité élevé.

The screenshot shows a user interface for creating a request. The user is identified as 'Agent 1', a 'Service engineer'. The interface has a sidebar with navigation options: Dashboard, Requests, Collaborations, Effectivity, Notifications, and Logout. The main area is titled 'REQUESTS' and shows a 'New request' button. Below this, there are tabs for 'Definition', 'Answer', 'Assessment', and 'Results'. The 'Definition' tab is active, showing the 'Request creation' form. The form includes the following fields and options:

- Id:** 2165
- Title:** Text input field.
- Description:** Text input field.
- Type:** Dropdown menu with 'Perfo' selected.
- Agency:** Dropdown menu with 'Health Monitoring' selected. A blue '+' button is next to it.
- Attached file:** Search input field with a paperclip icon.
- Priority:** Radio buttons for 'Low', 'Medium', and 'High'. The 'High' button is selected.

On the right side of the form, there are two empty boxes: 'Suggested agencies' and 'Validated agencies'. Red arrows point to the '+' button, the 'High' priority button, and both the 'Suggested agencies' and 'Validated agencies' boxes. A 'Validation' button is located at the bottom right of the form.

Figure 5.10 : Champs de définition d'une nouvelle requête

- Si l'ajout de l'agence Health Monitoring réussit, et qu'une suggestion d'autre agence apparaît donc : « **Vous approuvez la suggestion d'ajout d'agence émise par le HM.** »

Si l'agence « Health Monitoring » a été ajoutée avec succès (clic sur le « + » étant donné que le choix déjà sélectionné dans la liste déroulante est déjà « Health Monitoring ») la mention « Health Monitoring » apparaît dans le champ « Validated agencies ». Une nouvelle mention « Field rep (recommended by Health Monitoring) » apparaît alors dans le champ « Suggested agencies ». Il s'agit d'une invitation à ajouter cette agence en cliquant sur le petit « + » qui lui est accolé (Figure 5.11).

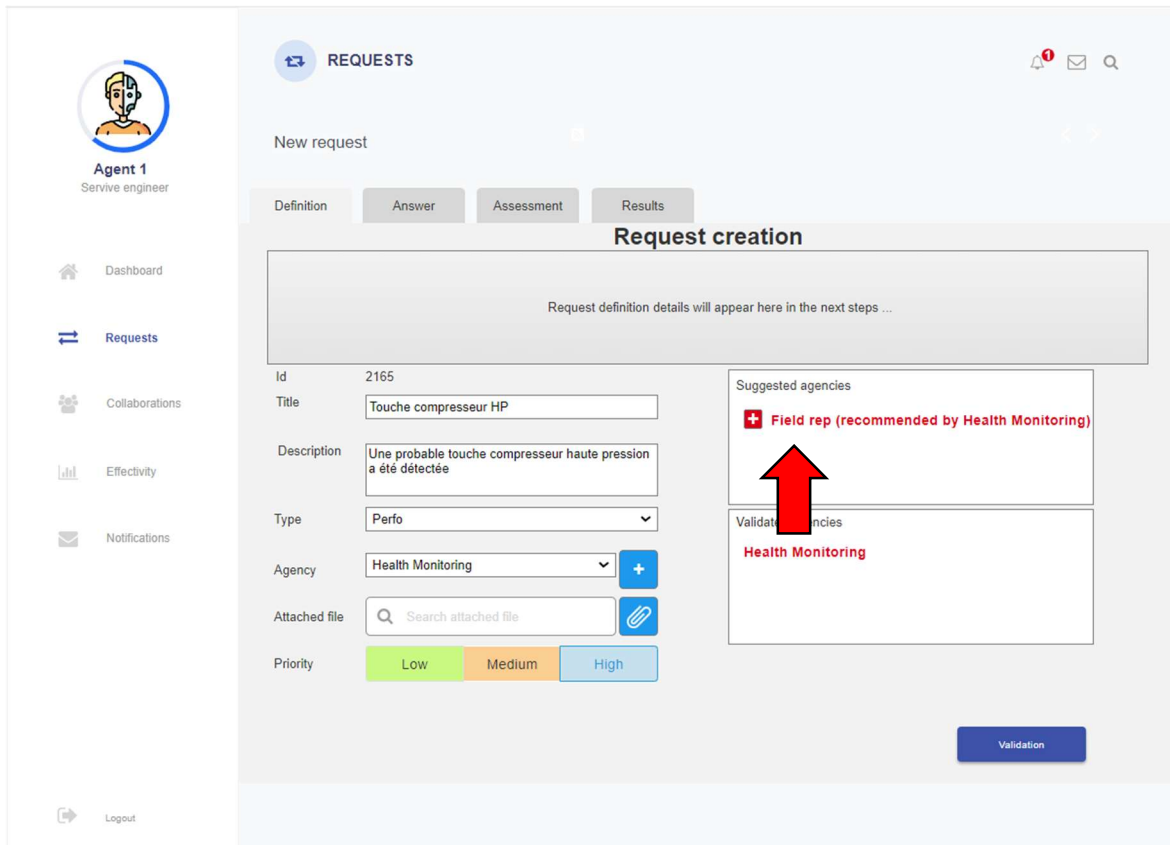


Figure 5.11 : Approbation de la suggestion d'un tiers

Au clic sur le « + », la mention « *Field rep* » glisse dans le champ « *Validated agencies* » ce qui signifie que cette agence sera sollicitée lors de la validation (Figure 5.12) de cette requête.

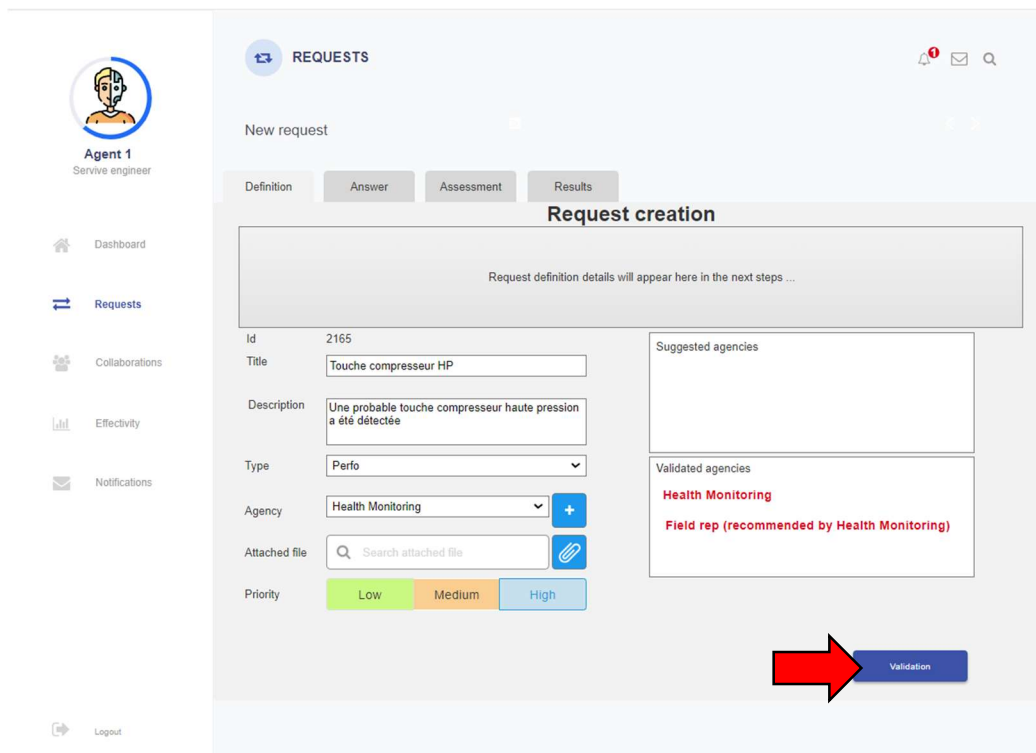


Figure 5.12 : Validation de la création d'une nouvelle requête

Enfin, la validation permet d'émettre les notifications aux agents concernés pour solliciter leur participation au processus de résolution.

- « **Proposez une option de réponse à cette request correspondant à une inspection endoscopique.** »

La validation du cas mène également à l'onglet suivant qui correspond aux propositions d'options (Figure 5.13). Tous les participants peuvent en proposer. Ici, il faut entrer les informations correspondant à une inspection endoscopique, éventuellement la description, les risques, bénéfices, commentaires puis cliquer sur « Valide option » ou le « + » qui y est accolé pour ajouter cette nouvelle option aux propositions, qui sera dont la première et seule pour le moment.

The screenshot shows a user interface for managing requests. On the left is a sidebar with navigation icons for Dashboard, Requests, Collaborations, Effectivity, and Notifications. The main area is titled 'REQUESTS' and shows a 'New request' card with details: Title 'Touche compresseur HP', Type 'Perfo', and Description 'Touche au niveau du compresseur haute pression qui impacte la performance moteur'. Below this is a 'Proposed answers to the request' section with a 'New option' form. The form has fields for 'Option title', 'Option description', 'Option benefits', 'Option risks', and 'Comment'. A blue '+ Validate option' button is at the bottom of the form. A legend at the bottom left defines option statuses: mandatory (red dot), past choice w/ pending result (grey dot), past choice w/ solved result (green dot), and past choice w/o effect (red dot). A blue 'Validation' button is at the bottom right of the interface. Red arrows point to the 'Validate option' button and the 'Validation' button.

Figure 5.13 : Champs de définition d'une nouvelle proposition d'option

Puis cliquer sur le bouton « Validation » en bas à droite pour transmettre aux autres participants l'option créée.

5.3.2.3.2 Scénario 2 – réponse à une notification

Ce deuxième scénario correspond à la participation à un scénario déjà existant (créé par un tiers) par l'utilisateur.

- « **Vous constatez que vous avez une notification, vous voulez voir de quoi il s'agit.** »

Pour ce faire, l'utilisateur peut cliquer soit sur la notification apparaissant au niveau de l'icône de cloche en haut à droite, soit sur l'onglet « Notifications » du menu de gauche (Figure 5.14).

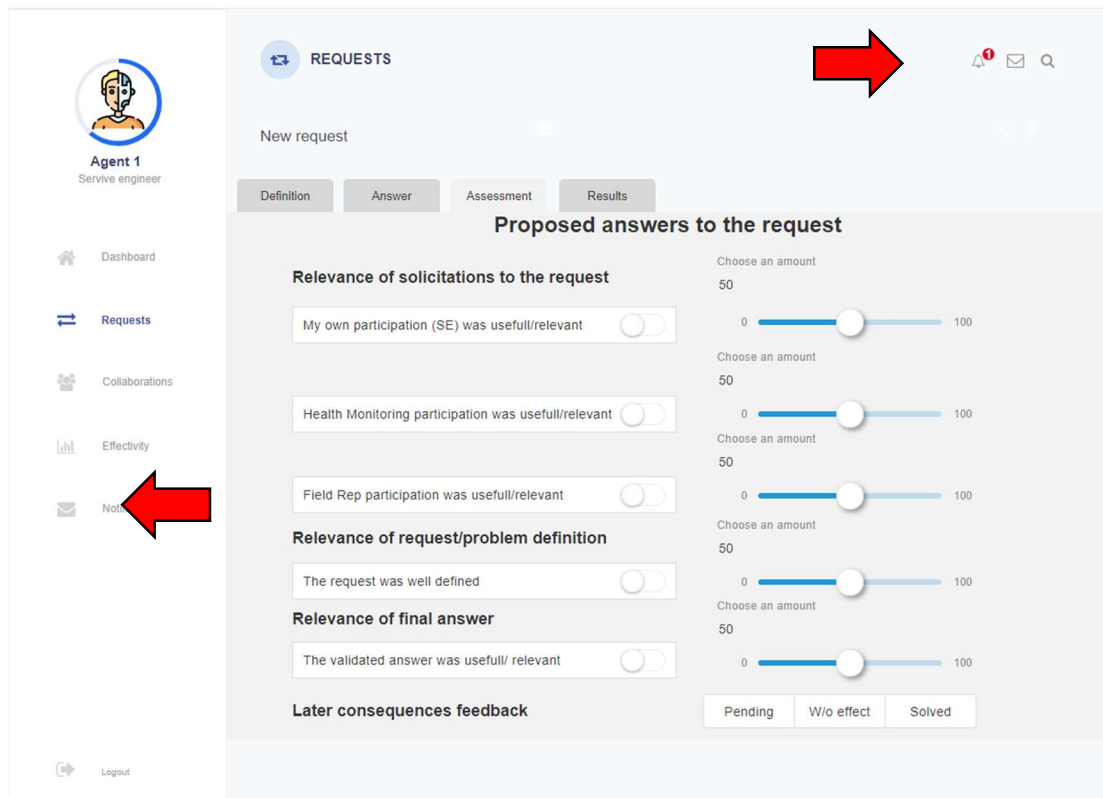


Figure 5.14 : Accès aux notifications

Cet onglet (Figure 5.15) présente toutes les notifications reçues, ici une seule. Il s'agit d'une requête et il faut cliquer dessus pour la découvrir.

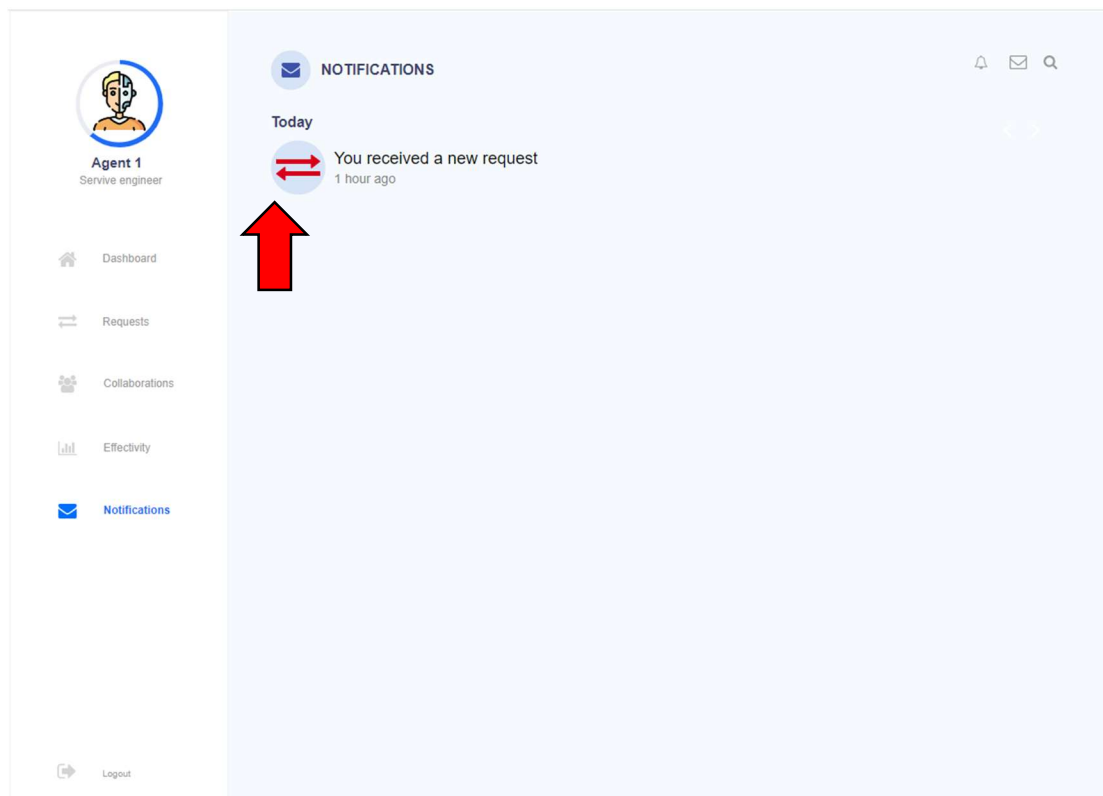


Figure 5.15 : Onglet des notifications

- « Parmi les options déjà proposées par le Field Rep, vous approuvez celle qui s'est déjà bien déroulée une fois par le passé selon les indicateurs. Vous voulez le faire savoir. »

Le clic précédent mène directement à l'onglet correspondant aux réponses, ou options, proposées (Figure 5.16). Sous le bandeau de description de la requête, deux options sont déjà proposées par le FR. Selon la légende visible en bas à gauche, l'option qui s'est bien déroulée une fois par le passé est l'option 1 car elle contient une pastille verte dans le champ « Past choice results ». Il faut donc activer le bouton « Approve » en cliquant dessus pour qu'il soit vert, et valider.

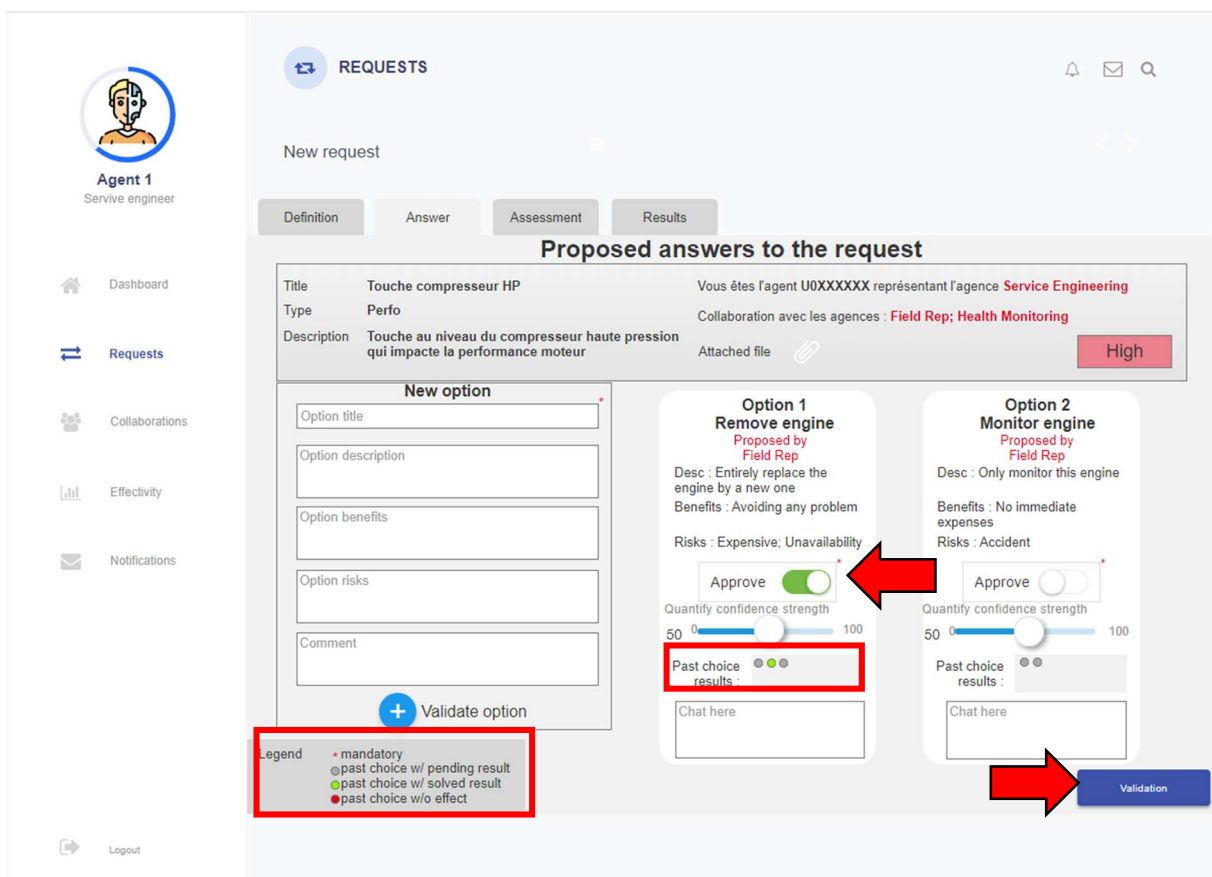


Figure 5.16 : Choix des options comportant des indicateurs stigmergiques (retex) et validation

- « Dans l'onglet d'évaluation (assessment) de cette prise de décision, vous voulez indiquer que vous avez trouvé toutes les interventions à 100% pertinentes. »

Sur cet onglet d'évaluation (Figure 5.17), des boutons d'évaluation permettent de valider ou non la pertinence des participations (celles des autres et sa propre expérience), la pertinence de la définition de la requête, et la pertinence de la réponse finale. Il est attendu ici de cliquer dessus pour tous les faire glisser sur la position avec couleur verte apparente. Le caractère binaire de ces réponses permet un traitement ultérieur flexible en collectant des données brutes les plus simples possibles. Cela limite également la complexité d'évaluation pour inciter son utilisation. Sur la droite, il y a également pour chacun un bouton que l'on peut faire glisser

pour apporter une quantification sur une échelle de 0 à 100. Cette évaluation plus précise peut être facultative. Elle semble faire doublon, mais le caractère continu peut apporter une plus grande finesse et être nécessaire dans certains contextes.

Il est attendu ici de mettre tous les boutons binaires sur la position verte et de faire glisser tous les boutons de droite sur 100 pour exprimer une participation à 100% pertinente. Le bouton de retour des conséquences doit être laissé sur « *pending* » étant donné que les conséquences ne sont ici pas encore connues.

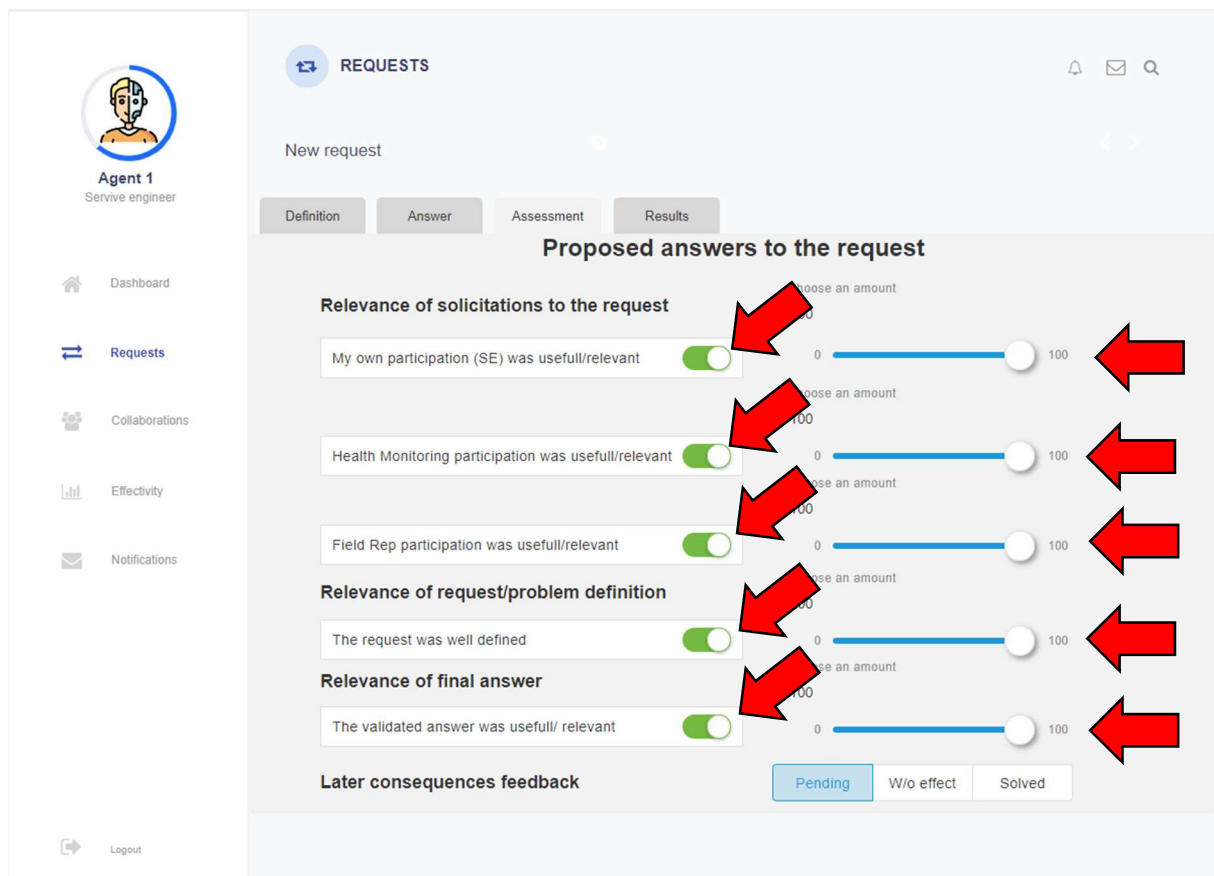


Figure 5.17 : Onglet d'évaluations des échanges et de la solution

- « Vous voulez voir dans l'onglet des résultats si les autres ont répondu à l'évaluation. »

Comme cet outil a pour but d'aiguiller vers les bons interlocuteurs pour régler un problème, il nécessite de collecter des données sur les échanges qui ont permis des résolutions, et non seulement sur la solution elle-même. Les évaluations des experts permettent cela. Elles sont accessibles dans l'onglet « Results » (Figure 5.18).

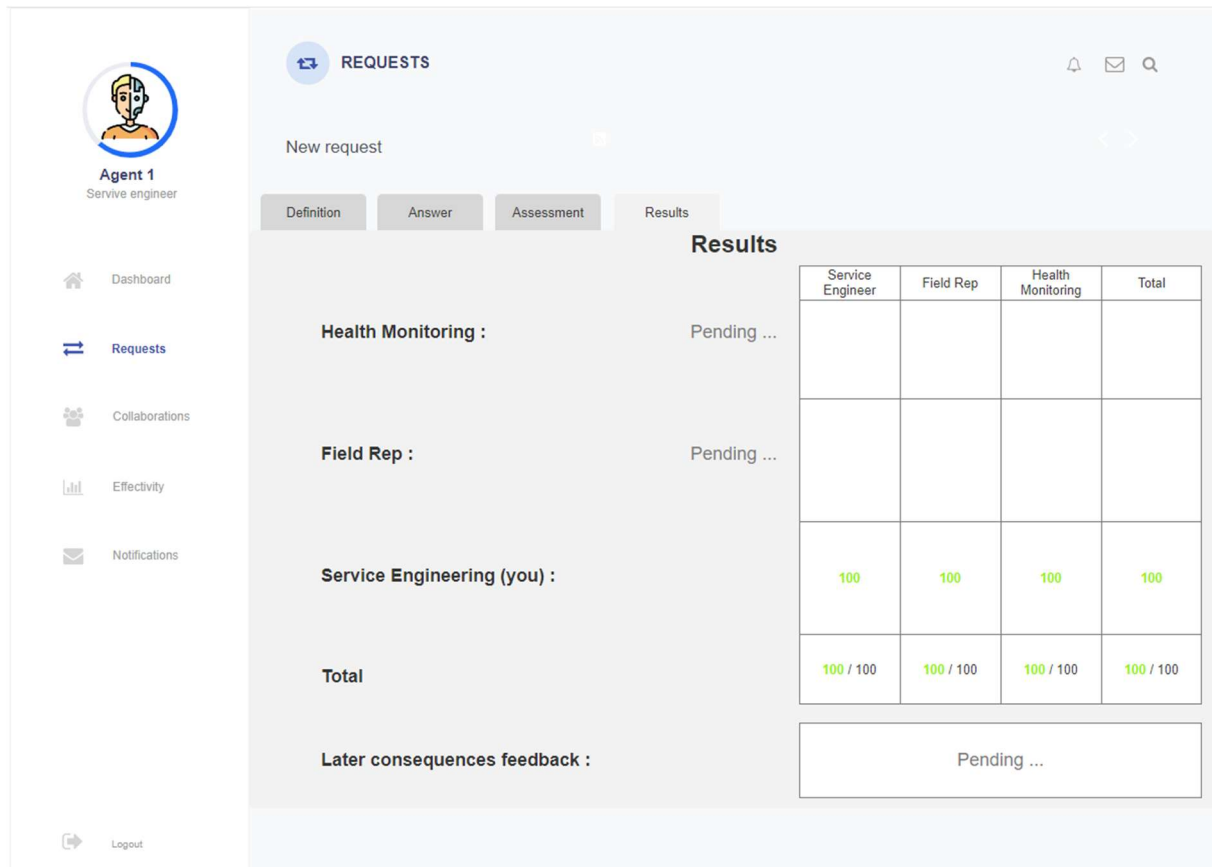


Figure 5.18 : Onglet des résultats des évaluations des participations et de la solution

- « Comment interprétez-vous ces résultats ? »

Ici, l'interprétation attendue est que l'utilisateur lui-même, en l'occurrence le SE, est le seul à avoir répondu. Les autres participants n'ont pas encore évalué ce cas.

5.3.2.4 Questionnaires - session 2

Cette deuxième session de questionnaires est toujours soumise sur l'ordinateur, via Microsoft Forms. Elle commence par le questionnaire d'échelle d'utilisabilité de système (SUS). Il a pour but de mesurer le niveau d'utilisabilité du système. Il comprend dix affirmations que le sujet doit évaluer sur une échelle de 1 à 5 (voir Annexe E : Utilisabilité (2^{ème} questionnaire)). 1 est la plus petite note et signifie que le sujet n'est pas du tout d'accord avec l'affirmation, et 5 est la plus grande et signifie que le sujet est tout à fait d'accord avec l'affirmation. Le résultat donnera une note d'utilisabilité de 0 à 100, 100 étant la meilleure note. Le mode de calcul est détaillé dans la Section 5.4.1 traitant des variables étudiées.

1. Je pense que je vais utiliser ce système fréquemment.

2. Je trouve ce système inutilement complexe.
3. Je pense que ce système est facile à utiliser.
4. Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système.
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système ont été bien intégrées.
6. Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce système.
7. J'imagine que la plupart des gens seraient capables d'apprendre à utiliser ce système très rapidement.
8. J'ai trouvé ce système très laborieux à utiliser.
9. Je me sentais très en confiance en utilisant ce système.
10. J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système.

À la suite de cette évaluation SUS, des questions ouvertes sont posées. Elles laissent assez de liberté au sujet pour exprimer ce qu'il veut. Les questions sont les suivantes :

Que modifieriez-vous ?

Remarques sur le scénario 1 - Création d'une requête et d'une option (question facultative)

Remarques sur le scénario 2 - Choix de l'option parmi les propositions du cas existant (question facultative)

5.3.2.5 Tests des indicateurs stigmergiques

5.3.2.5.1 Indicateurs isolés

A la suite de la deuxième session de questionnaires, une explication des indicateurs stigmergiques (Figure 5.19) présents sur l'interface est apportée pour que tous les sujets soient égaux dans sa compréhension pour commencer l'expérience suivante. Cette expérience consiste en des mises en situations. Plus précisément, des mises en micro-situations qui sont des dilemmes (options proposées à peu près équivalentes) pour lesquels ces indicateurs peuvent donc être les seuls repères différenciants. Une pastille verte correspond à un retour positif suite après que ce choix a été

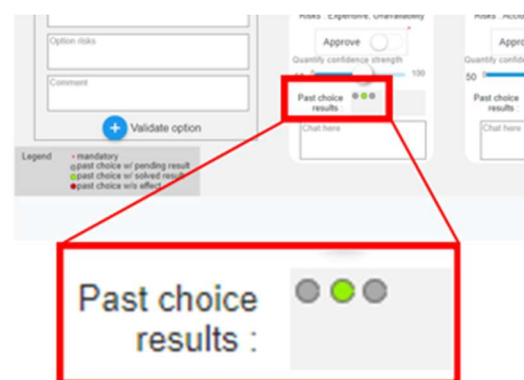


Figure 5.19 : Indicateurs stigmergiques

fait par le passé, une pastille rouge correspond à un retour négatif et une pastille grise correspond à une issue inconnue. Les choix à effectuer sont au nombre de 54. C'est le nombre nécessaire pour présenter toutes les combinaisons des différents niveaux des facteurs testés. Le détail des facteurs testés est décrit dans la partie suivante qui concerne les variables étudiées lors des expériences. Le temps mis pour chaque choix est également relevé. Les choix à faire sont présentés dans un ordre aléatoire pour éviter que les statistiques ne soient biaisées notamment par le biais d'apprentissage (temps plus long pour les premiers dilemmes puis accélération).

Pour chaque dilemme présenté (Figure 5.20), des informations contextuelles sont données dans les encadrés du haut (machine concernée et symptômes) et deux options sont proposées dans les encadrés du bas. Le bouton « Choix 1 » permet de choisir l'option de gauche et le bouton « Choix 2 » l'option de droite.

A/C Registration – KJHKJ Engine Type – Arriel2E Engine SN - 5545 Engine Position - LH	
Symptoms	
Cold second chance Hot second chance Initial acceleration	often rarely stable
Root cause	Root cause
START INJECTORS CLOGGED	AUTOMATIC AIR PURGE: LEAK
●	● ● ● ● ●
Reco	Reco
Clean or replace start injectors	Test or replace the automatic air purge valve
Choix 1	Choix 2

Figure 5.20 : Exemple de dilemme avec des boutons de choix

En plus des 54, trois dilemmes supplémentaires sans aucun indicateur se trouvent dans la série (Figure 5.21). Ils sont des témoins, pour confirmer le fait qu'il n'est pas évident de choisir entre les deux options sans aide.

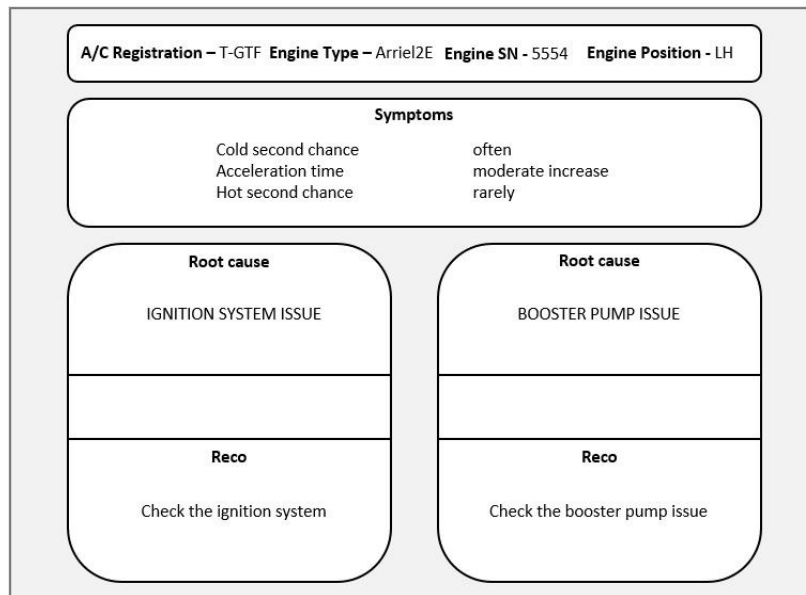


Figure 5.21 : Exemple de dilemme témoin

5.3.2.5.2 Indicateurs dépendants

Cette expérience est en quelque sorte cachée dans la précédente. Parmi les dilemmes présentés précédemment (54 dilemmes + 3 témoins) sont insérés 6 dilemmes de plus (il y en a donc 63 au total), cette fois-ci sans aucune information contextuelle (Figure 5.22). Le choix ne peut donc se baser que sur les indicateurs stigmergiques. Cependant, concernant ces cas, les indicateurs présentés sont les résultats des choix des utilisateurs précédents. Le premier utilisateur se voit présenter une erreur (faux positifs ou faux négatifs) car l'objectif est de tester la robustesse aux erreurs. Ces six cas sont divisés en trois paires. Chacune commence par un faux positif et un faux négatif, présentés au premier utilisateur. La première paire a une persistance faible, c'est-à-dire qu'elle ne présente que le résultat du choix de l'utilisateur précédent. La deuxième paire présente le résultat des choix des trois utilisateurs précédents. La troisième présente le résultat des choix de tous les utilisateurs précédents. Le but est de montrer qu'il existe un juste dosage qui se trouve entre l'effacement trop rapide des résultats précédent et la conservation de tous les résultats qui peuvent induire en erreur. De plus, par souci de réalisme, seulement un indicateur sur trois donne un retour sur les conséquences du choix (vert en cas de retour positif et rouge en cas de retour négatif) tandis que les autres indicateurs sont présents mais neutres (gris pour un retour inconnu).

Pour clarifier le mécanisme en jeu les figures suivantes montrent des exemples d'interfaces présentées au sixième utilisateur et les conséquences de ses choix sur les interfaces présentées au septième utilisateur. Sans information contextuelles, les seuls éléments importants car contenant de l'information ici sont les indicateurs stigmergiques (pastilles colorées).

Sur la Figure 5.22, il s'agit à gauche de l'interface présentée au sixième participant aux expériences. Comme il s'agit d'une des deux interfaces de la paire avec persistance faible, seul l'indicateur émanant du choix de l'utilisateur précédent lui est présenté. En l'occurrence, une pastille grise sur le choix de gauche, ce qui signifie que l'utilisateur précédent a choisi le choix

de gauche, mais que pour cette itération, le retour n'est pas connu : la pastille n'est ni verte ni rouge. La pastille grise permet donc uniquement de savoir que ce choix-ci a été effectué, mais ne permet pas de connaître le caractère positif ou négatif des conséquences de ce choix. Face à ce dilemme, ce sixième utilisateur choisit, comme son prédécesseur, l'option de gauche. Étant donné qu'il s'agit en réalité du mauvais choix, le septième utilisateur, qui lui succède, voit apparaître une pastille rouge sur cette option. En effet, un retour sur trois est connu, et cela tombe sur cette itération. Enfin, comme il s'agit d'un dilemme à persistance faible, l'indicateur précédent disparaît.

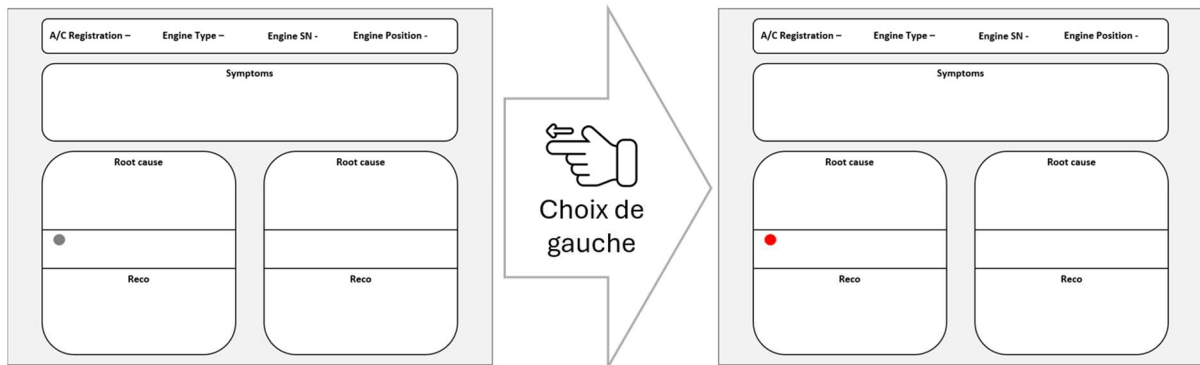


Figure 5.22 : Corrélation entre les indicateurs du sixième utilisateur et du septième utilisateur sur le premier dilemme (faux positif) de la première paire (persistance faible) d'indicateurs corrélés

Sur la Figure 5.23, il s'agit du passage du sixième utilisateur au septième utilisateur, mais cette fois-ci sur l'un des dilemmes de la paire à persistance moyenne. Le sixième utilisateur voit donc les indicateurs découlant des trois derniers choix successifs effectués par ses prédécesseurs (interface de gauche). Le troisième utilisateur avait fait le choix de l'option de gauche (mauvais puisque la pastille est rouge) puis les quatrième et cinquième utilisateurs ont choisi l'option de droite. Ces derniers choix ont généré les deux pastilles grises sur l'option de droite. Les choix des utilisateurs précédents ont disparu puisque seulement les trois derniers choix apparaissent. Le sixième utilisateur choisit l'option de droite qui s'avère être objectivement le bon choix. Son successeur, le septième utilisateur, voit donc sur son interface (à droite) une pastille verte supplémentaire sur l'option de droite tandis que l'indicateur rouge, qui est la plus ancien, a disparu.

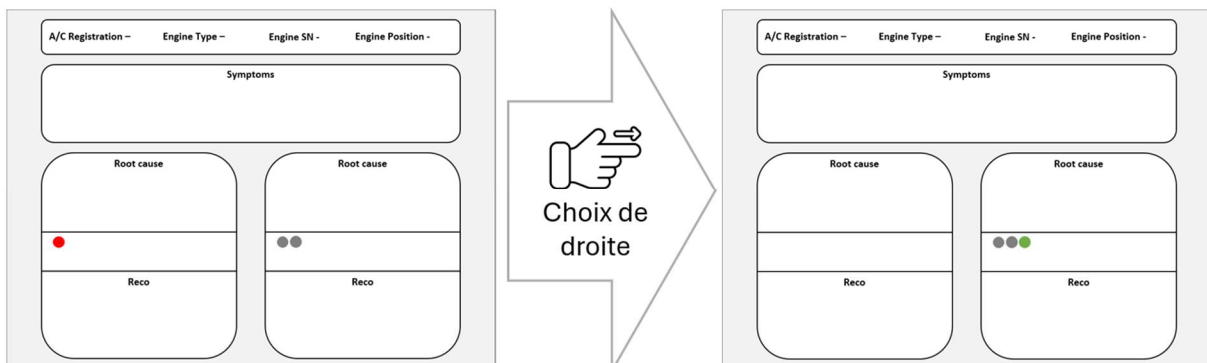


Figure 5.23 : Corrélation entre les indicateurs du sixième utilisateur et du septième utilisateur sur le premier dilemme (faux positif initial) de la deuxième paire (persistance de trois pas itératifs) d'indicateurs corrélés

La Figure 5.24 présente l'interface présentée au sixième utilisateur (à gauche) concernant l'un des dilemmes à persistance perpétuelle. Tous les indicateurs des choix précédents sont visibles. Comme il s'agit du premier dilemme de la paire à persistance perpétuelle, le premier utilisateur a été confronté à un faux positif, qui est toujours visible sur l'option de gauche. Le sixième utilisateur fait ici le choix de l'option de gauche. L'interface présentée au septième utilisateur (à droite) comporte donc une pastille rouge supplémentaire sur l'option de gauche puisqu'il s'agit en réalité du mauvais choix objectif. Aucun indicateur ne disparaît.

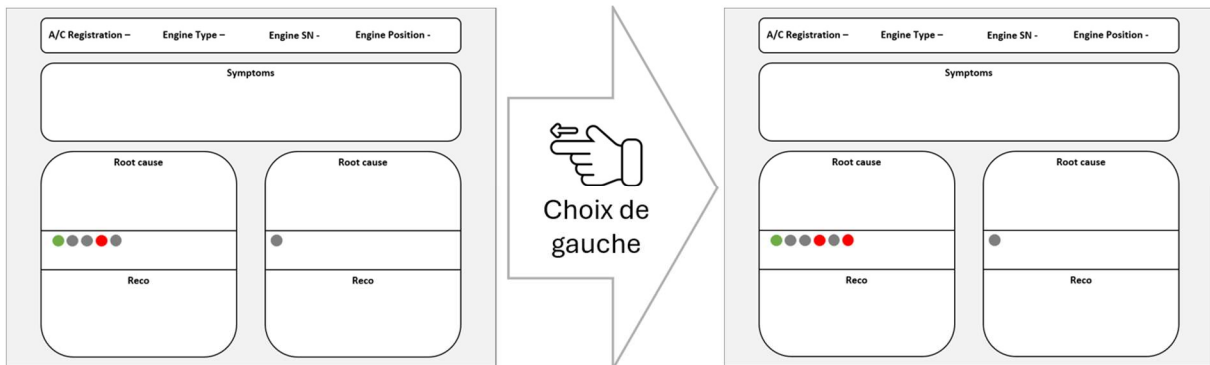


Figure 5.24 : Corrélation entre les indicateurs du sixième utilisateur et du septième utilisateur sur le premier dilemme (faux positif initial) de la troisième paire (persistance perpétuelle) d'indicateurs corrélés

Ce dernier choix correspond à une erreur supplémentaire comptabilisée sur ce dilemme. Pour toutes les itérations de tous les dilemmes à indicateurs corrélés, si une erreur est faite, elle sera comptabilisée pour obtenir le suivi des erreurs cumulées au cours des itérations.

5.3.2.6 Questionnaires - session 3

Comme lors de la première session de questionnaires suivant le formulaire de consentement et précédant les tests utilisateurs de l'interface générale, un Collective Cognition Scale est soumis. Pour le premier, l'utilisateur répondait aux questions selon ce qu'il sait et perçoit de l'entreprise telle quelle (AS IS) tandis que pour ce deuxième, il répond aux questions selon ce qu'il pense que l'entreprise deviendrait dans le cas où elle aurait à disposition un tel outil intégré dans ses pratiques (TO BE).

5.4 Analyse des résultats

5.4.1 Variables étudiées

La partie précédente détaille le protocole expérimental en expliquant succinctement la raison d'être de chaque partie. Même si elle évoque les données qui peuvent être collectées, cette partie synthétise et donne plus de détails sur le type de données collectées.

5.4.1.1 Utilisabilité de l'interface générale

Le SUS (System Usability Scale) est une grille d'évaluation déjà existante pour les systèmes en général qui permet d'obtenir une note sur 100 pour évaluer l'utilisabilité de l'interface

générale de l'outil de prise de décision collaborative. Il s'agit de dix affirmations comme présentées précédemment, que l'utilisateur note de 1 – pas du tout d'accord - à 5 – tout à fait d'accord.

- Pour les affirmations numérotées de façon impaire (non inversées) :

$$Score\ impairs = (S1 + S3 + S5 + S7 + S9) - 1$$

- Pour les affirmations numérotées de façon paire (inversées) :

$$Score\ pairs = 5 - (S2 + S4 + S6 + S8 + S10)$$

- Les scores issus des affirmations paires et impaires sont additionnés :

$$Score\ total\ recalculé = Score\ impairs + Score\ pairs$$

- Le score total est recalculé est multiplié par 2,5 pour obtenir le score global du SUS sur 100 :

$$Score\ SUS = Score\ total\ recalculé \times 2.5$$

- La moyenne de tous les utilisateurs peut être faite. Ceci se résume globalement par la formule suivante :

$$Score\ SUS = \left(\left(\sum_{i=1,3,5,7,9} s_i - 1 \right) + \left(5 - \sum_{i=2,4,6,8,10} s_i \right) \right) \times 2,5$$

$$\begin{cases} S_i = N_i - 1 \text{ avec } N \text{ la note de l'utilisateur à la question } i \text{ et } i = 1,3,5,7,9 \\ S_i = 5 - N_i \text{ avec } N \text{ la note de l'utilisateur à la question } i \text{ et } i = 2,4,6,8,10 \end{cases}$$

$$SUS = 2,5 \times \sum_{i=1}^{i=10} S_i$$

5.4.1.2 Stigmergie

Lors de l'expérience portant sur les indicateurs stigmergiques, le comportement induit par ces indicateurs est étudié. Pour cela, plusieurs facteurs sont étudiés. Ils correspondent aux caractéristiques des indicateurs présentés et sont les variables explicatives.

5.4.1.2.1 Indicateurs isolés

Pour ces expériences, à chaque dilemme, l'un des deux choix possibles est l'option référence. Il se trouve aléatoirement à gauche ou à droite. C'est en fonction de celui-ci que les différents niveaux des facteurs sont représentés.

Variables explicatives

1. Couleur des retours connus (Nom de la variable dans l'analyse : **Couleur.K.positif**, en référence à la couleur qui incite à sélectionner le choix référence de manière positivement corrélée au coefficient, avec K comme knowledge)
Les couleurs donnent la connaissance sur les retours des choix passés (vert : positif ; gris : inconnu ; rouge : négatif). Ce facteur comporte trois niveaux :
 - a. Positif : pour le niveau positif, la couleur signifie qu'il y a plus de retours positifs et/ou moins de retours négatifs sur l'option référence ;

- b. Equivalent : cela signifie que la couleur n'incite à choisir ni l'option référence, ni l'autre ;
 - c. Négatif : le couleur n'incite pas à choisir l'option référence mais plutôt à cliquer sur l'autre.
2. Proportion de retours connus (**Prop.K** comme proportion de connaissance)
- Les retours connus sont les pastilles colorées en rouge ou vert. Les retours dont le résultat n'est pas connu correspondent à des pastilles grises. Il y a trois niveaux de proportion de retours connus :
- a. 1:1 : la totalité des résultats des retours sont connus, la totalité des pastilles sont colorées ;
 - b. 1:3 : un tiers des pastilles sont colorées ;
 - c. 1:5 : un cinquième des pastilles sont colorées.
3. Quantité totale de retours (**Tot.Q** comme total et quantité)
- Mis à part dans les trois cas de choix témoins qui ne contiennent aucun indicateur, chaque option contient une certaine quantité d'indicateurs (ou pastille). Il y a deux niveaux de quantité :
- a. Beaucoup : chaque option contient maximum 24 pastilles ;
 - b. Peu : chaque option contient maximum 6 pastilles.
4. Différence de quantité de retours (**Diff.Q** comme différence et quantité)
- La quantité d'indicateurs peut différer ou non d'un côté par rapport à l'autre. Ces différents niveaux de différence sont au nombre de trois :
- a. 1:1 : les deux options contiennent la même quantité d'indicateurs ;
 - b. 3:1 : l'option référence comporte trois fois plus de pastilles que l'option alternative ;
 - c. 6:1 : l'option référence comporte six fois plus de pastilles que l'option alternative.

Variables de réponses

En réponse aux options suivant les facteurs présentés précédemment, l'utilisateur va choisir ou non, l'option référence. On va donc collecter deux données générées par ce choix grâce au programme développé pour cela :

- Choix (binaire) : l'utilisateur, a-t-il choisi l'option référence ou pas ? (0 = pas choisi et 1 = choisi). Pour l'analyse, les données concernant le choix ou non de l'option référence sont agrégées pour donner le **Pourcentage** du nombre de choix de cette option sur le dilemme concerné. Cette agrégation est donc renommée **Pourcentage**.
- Temps (en seconde) : combien de temps l'utilisateur a-t-il mis pour choisir une option, c'est-à-dire à cliquer sur l'une des deux options ? Pour l'analyse, cette donnée de temps est agrégée en moyenne générale du temps de réponse sur ce dilemme.

5.4.1.2.2 Indicateurs dépendants

Dans cette expérience, l'une des deux options comporte un indicateur erroné. Comme expliqué précédemment, les indicateurs présentés ensuite à un utilisateur dépendent du choix des utilisateurs précédents sachant que les suivant ne seront pas erronés, mais seulement un sur trois sera connu. Cela concerne trois paires de cas (dans une paire, un cas présente un faux

positif, un autre présente un faux négatif). La première paire ne présente que l'indicateur issu du choix de l'utilisateur précédent, la deuxième paire présente les indicateurs issus des choix des trois utilisateurs précédents et la troisième présente les indicateurs de tous les utilisateurs précédents qui ne s'effacent jamais.

- Choix juste (binaire) : comme pour le choix référence dans l'expérience des indicateurs isolés, il s'agit dans ce cas du choix ou non de la bonne réponse objective (0 = bonne réponse pas choisie et 1 = bonne réponse choisie).

5.4.1.3 Échelle de cognition collective

Chaque question est notée sur une échelle de 1 à 5 et le calcul de la note globale est le même que pour le SUS.

La CCS (Collective Cognition Scale) est une grille d'évaluation conçue spécifiquement pour les organisations, dont la conception a été détaillée dans la Section 4.3.3, qui permet d'obtenir une note sur 100 pour évaluer le niveau de cognition collective lors d'une activité. Il s'agit de dix affirmations que l'utilisateur note de 1 – pas du tout d'accord - à 5 – tout à fait d'accord.

- Pour les affirmations numérotées de façon impaire (non inversées) :

$$Score\ impairs = (S1 + S3 + S5 + S7 + S9) - 1$$
- Pour les affirmations numérotées de façon paire (inversées) :

$$Score\ pairs = 5 - (S2 + S4 + S6 + S8 + S10)$$
- Les scores issus des affirmations paires et impaires sont additionnés :

$$Score\ total\ recalculé = Score\ impairs + Score\ pairs$$
- Le score total est recalculé est multiplié par 2,5 pour obtenir le score global du SUS sur 100 :

$$Score\ CCS = Score\ total\ recalculé \times 2.5$$
- La moyenne de tous les utilisateurs peut être faite. Ceci se résume globalement par la formule suivante :

$$Score\ CCS = \left(\left(\sum_{i=1,3,5,7,9} s_i - 1 \right) + \left(5 - \sum_{i=2,4,6,8,10} s_i \right) \right) \times 2,5$$

$$\begin{cases} S_i = N_i - 1 \text{ avec } N \text{ la note de l'utilisateur à la question } i \text{ et } i = 1,3,5,7,9 \\ S_i = 5 - N_i \text{ avec } N \text{ la note de l'utilisateur à la question } i \text{ et } i = 2,4,6,8,10 \end{cases}$$

$$CCS = 2,5 \times \sum_{i=1}^{i=10} S_i$$

5.4.2 Utilisateurs étudiés

Voici quelques caractéristiques démographiques (Figure 5.25) des participants. Quinze utilisateurs, majoritairement des hommes, ont été testés : environ la moitié du service HM, l'autre du service SE.

Sans surprise étant donné leurs métiers, 100% des participants utilisent quotidiennement des outils informatiques, ce qui les positionne sur un pied d'égalité concernant les aptitudes associées. Les âges (Figure 5.26) présentent la répartition classique d'une population active.

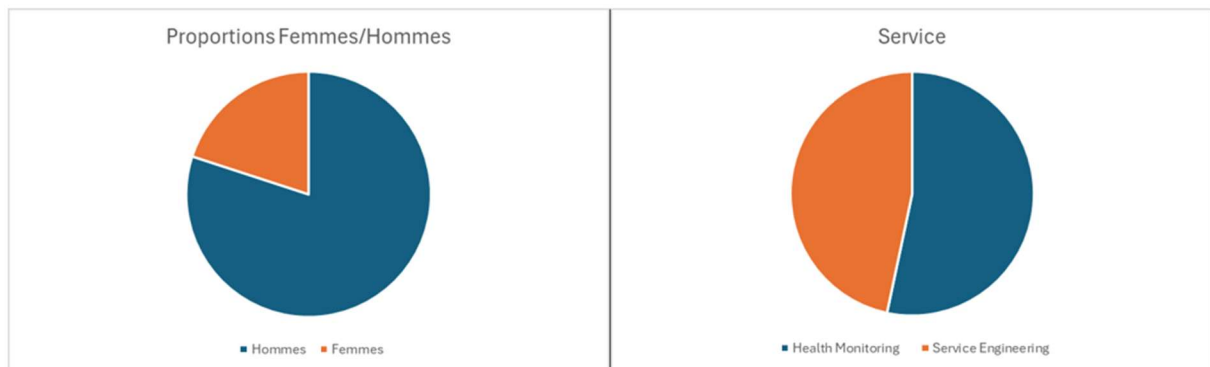


Figure 5.25 : Diagrammes en secteurs présentant la répartition femmes/hommes et la répartition par service

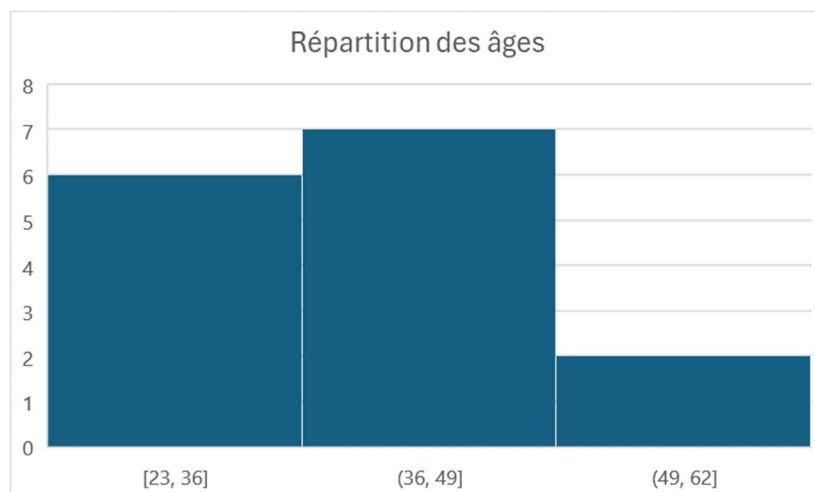


Figure 5.26 : Histogramme des âges répartis selon des classes d'intervalles égaux

5.4.3 Utilisabilité du système

Dans un premier temps, l'étude de l'utilisabilité générale du système d'aide à la décision permet de valider sa première condition de réussite : la bonne compréhension de son fonctionnement et l'aspect intuitif de ses différentes fonctionnalités.

Pour cela, les remarques sont prises en compte pour des améliorations itératives (tous les cinq tests utilisateurs). De plus, à l'issue du test utilisateur suivant les deux scénarios décrits précédemment, un questionnaire a été posé pour chaque personne afin d'évaluer son utilisabilité (Tableau 5.1). Il s'agit du System Usability (SUS), questionnaire déjà existant dans la littérature scientifique en facteur humain et largement reconnu. Il permet d'obtenir une note sur une échelle de 0 à 100, 100 étant la meilleure note d'utilisabilité.

Tableau 5.1 : Résultats finaux au SUS de chaque utilisateur

Utilisateur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Résultat SUS	87,5	97,5	77,5	62,5	70	70	87,5	87,5	75	75	85	67,5	90	90	77,5

En vue de tendre vers une objectivisation de l'interprétation des résultats de cette échelle, des études ont été menées à son sujet. On y voit sur la Figure 5.27 que la plus mauvaise note obtenue, 62,5, peut être considérée comme correspondant à une utilisabilité entre acceptable et bonne. La meilleure, 97,5, comme correspondant à la meilleure que l'on puisse imaginer.

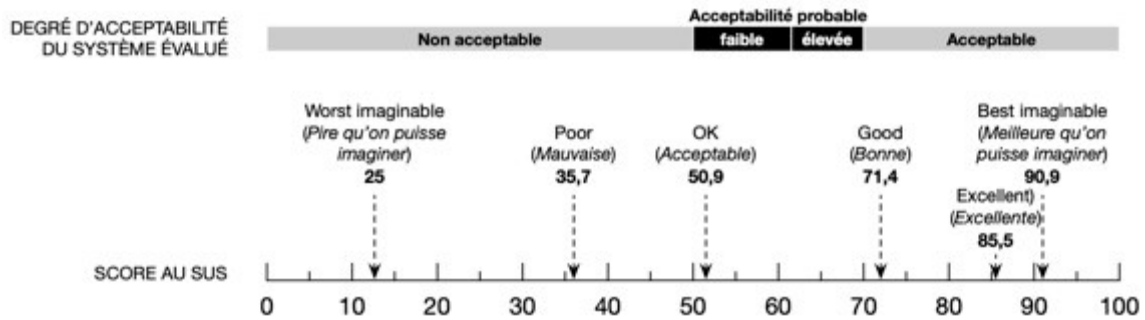


Figure 5.27 : Signification du score au SUS (adaptée de Bangor, Kortum et Miller, 2009)

Que l'on se fie, comme le montre la boîte à moustache des résultats en Figure 5.28, à la moyenne (80) ou à la médiane (77,5) pour diminuer la sensibilité aux valeurs extrêmes, on peut en conclure, d'après cette échelle d'utilisabilité de système, qu'il est acceptable. Néanmoins, même s'il peut être considéré comme très bon, il ne s'agit pas du meilleur que l'on puisse imaginer et des améliorations sont toujours possibles. C'est l'objectif de ce prototype que d'identifier les aspects qui doivent être présents dans la version opérationnelle et définitive ou non.

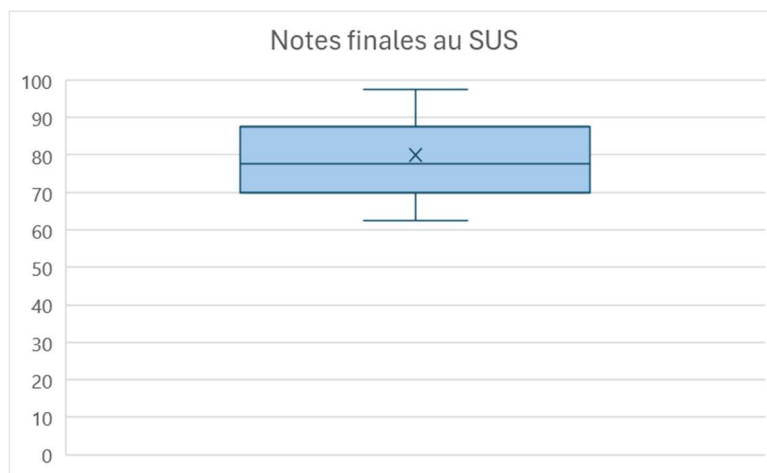


Figure 5.28 : Boîte à moustache des résultats finaux au SUS

5.4.4 Impact direct des indicateurs stigmergiques

Maintenant que l'utilisabilité générale du système a été évaluée dans la partie précédente, cette partie présente une analyse de l'expérience sur un aspect plus précis : les indicateurs stigmergiques. Dans un espace physique, un panneau « fermé » ou un écriteau « sol glissant » est un message laissé dans l'environnement. Il est partagé par une personne pour informer

les personnes suivantes sur la situation et éventuellement influencer sur leur comportement (stigmergie). De la même manière, dans un espace numérique, des pastilles de couleurs indiquent des retours d'expérience dans l'environnement de prise de décision. L'objectif est d'analyser les comportements générés par différents facteurs dans la présentation de ces indicateurs. Que ces comportements soient bénéfiques ou non, cela représente des informations intéressantes pour la conception de systèmes d'aide à la décision collaborative. Comme expliqué dans la partie détaillant le protocole, dans chaque dilemme, un choix référence est associé positivement à chaque facteur. Autrement dit, s'il y a une disproportion dans la quantité d'indicateur entre les deux choix avec un rapport de 3:1, alors le choix référence est celui qui comporte trois fois plus d'indicateurs. Ce choix référence ne présente bien sûr aucune marque distinctive pour l'utilisateur et est présenté aléatoirement à gauche ou à droite afin d'éviter les biais. Pour chaque cas dans l'analyse, la proportion d'utilisateurs ayant choisi le choix référence est étudiée sous forme de **Pourcentage** (exemple : si la variable **Pourcentage** est égale à 60, cela signifie que 60% des utilisateurs ont sélectionné le choix référence).

5.4.4.1 Description

Les diagrammes suivants (Figure 5.29) présentent les moyennes de **Pourcentage** pour chaque facteur (voir la Section 5.4.1.2.1 sur les variables étudiées pour le détail de chaque facteur). Pour chaque facteur, plusieurs niveaux ont été expérimentés. Les facteurs ont été combinés entre eux. Certains paraissent particulièrement impacter le choix. Pour confirmer cela, une analyse des effets et interactions est présentée dans la partie suivante.

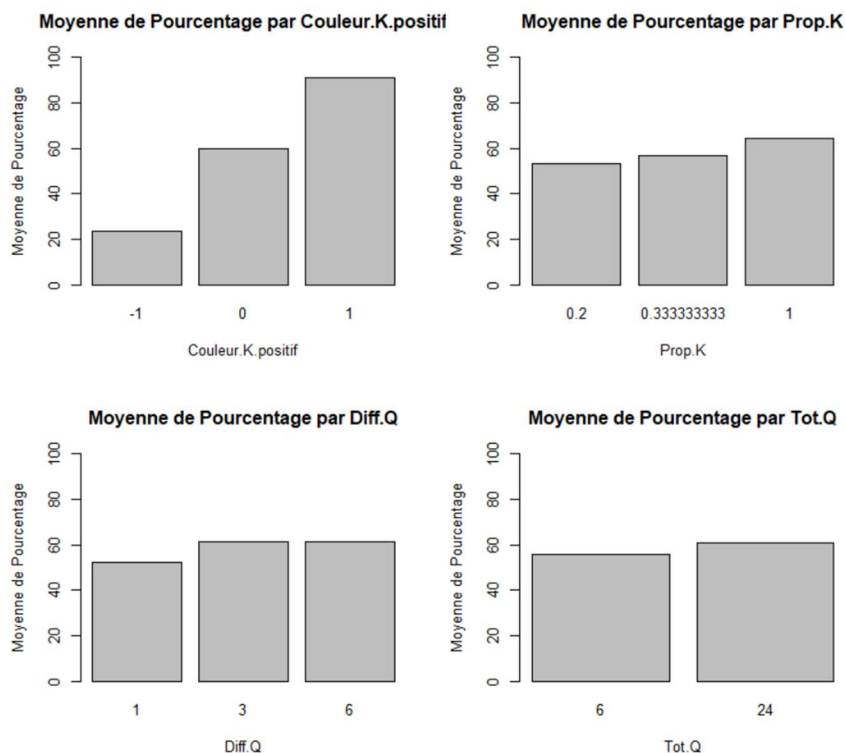


Figure 5.29 : Moyennes de la variable **Pourcentage** pour chaque facteur

5.4.4.2 Effets et interactions

Pour analyser les effets des facteurs sur le choix, statistiquement parlant des variables indépendantes sur la variable dépendante, une analyse des variances (ANOVA) a été effectuée (Fisher, 1934). Il ressort que certains facteurs ont un effet statistiquement significatif ($\alpha = 0,05$) comme présenté dans le

Tableau 5.2. Par ordre de significativité : **Couleur.K.positif**, **Prop.K** et **Diff.Q**. Plus le niveau de **Couleur.K.positif** est élevé, plus le choix référence est sélectionné. Ce n'est pas surprenant puisque le niveau élevé de **Couleur.K.positif** correspond à une couleur verte signifiant un retour sur expérience plus positif sur le choix référence que sur l'autre choix. Une interaction significative existe entre **Prop.K** et **Couleur.K.positif**.

Tableau 5.2 : Résultats de l'ANOVA des variables indépendantes sur la variable **Pourcentage**

	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur F	Pr(>F)
Prop.K	1	1147	1147	8,179	0,00685 **
Diff.Q	1	611	611	4,357	0,04361 *
Tot.Q	1	363	363	2,587	0,11601
Couleur.K.positif	1	40893	40893	291,493	< 2 ⁻¹⁶ ***
Prop.K:Diff.Q	1	2	2	0,018	0,89525
Prop.K:Tot.Q	1	17	17	0,123	0,72813
Diff.Q:Tot.Q	1	112	112	0,800	0,37662
Prop.K: Couleur.K.positif	1	845	845	6,023	0,01881 *
Diff.Q : Couleur.K.positif	1	150	150	1,071	0,30730
Tot.Q : Couleur.K.positif	1	316	316	2,253	0,14164
Prop.K:Diff.Q:Tot.Q	1	136	136	0,970	0,33101
Prop.K:Diff.Q: Couleur.K.positif	1	134	134	0,956	0,33430
Prop.K:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	358	358	2,549	0,11868
Diff.Q:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	3	3	0,023	0,87985
Prop.K:Diff.Q:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	16	16	0,116	0,73562

Résidus	38	5331	140		
Codes de significativité : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1					

La Figure 5.30 permet de mieux comprendre l'interaction entre **Couleur.K.positif** et **Prop.K**. Il s'agit d'un diagramme d'interaction entre les facteurs **Prop.K** et **Couleur.K.positif** sur la variable **Pourcentage**. Chaque ligne verticale représente la variation du pourcentage selon le niveau de **Couleur.K.positif** pour un niveau donné de **Prop.K**. Plus les lignes sont parallèles, plus l'interaction est faible. Il apparaît que plus le niveau de **Prop.K** est élevé, moins le niveau de **Couleur.K.positif** a d'effet sur **Pourcentage**. Autrement dit, plus la proportion d'indicateurs sont colorés (vert ou rouge et non gris) et représentent donc des retours connus, plus la couleur a un effet modéré sur le choix.

Cette ANOVA est pertinente à condition que certaines hypothèses soient vérifiées. La première est la normalité des résidus (Tabachnick & Fidell, 2013). C'est-à-dire que la partie non expliquée des variances doit suivre une loi normale. Les diagrammes ci-dessous permettent de l'observer graphiquement. À gauche de la Figure 5.31, la forme de cloche présentée par l'histogramme permet de confirmer que les résidus suivent approximativement une loi normale. De la même manière, le Q-Q plot à droite de la Figure 5.31 permet de vérifier que les observations (les points) correspondent approximativement aux valeurs théoriques (la droite). Ici, elles semblent les suivre de manière satisfaisante.

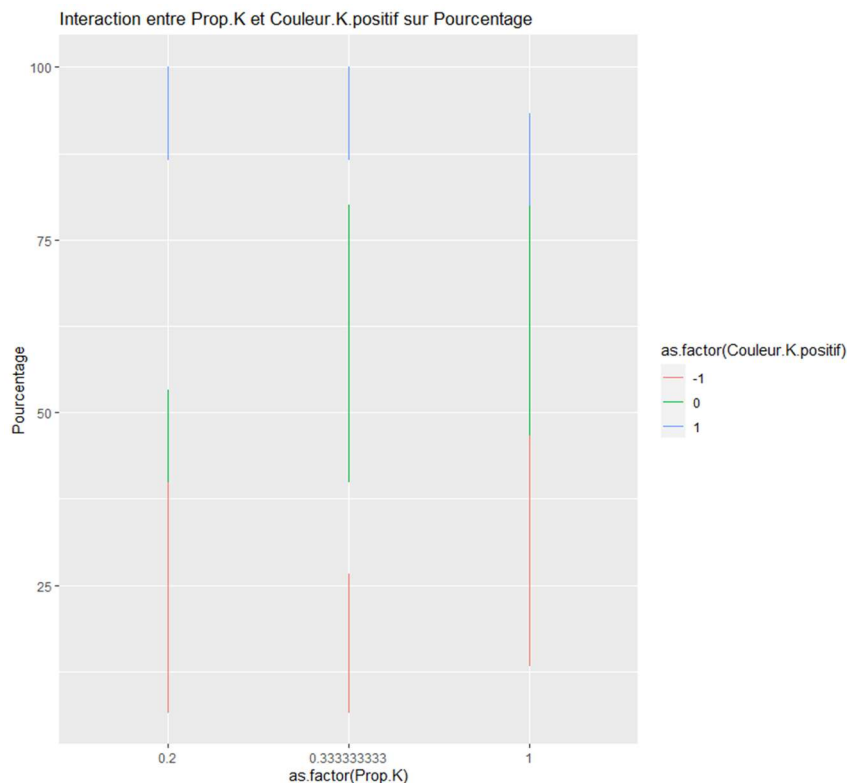


Figure 5.30 : Diagramme des interactions entre **Prop.K** et **Couleur.K.positif** dans leur effet sur **Pourcentage**

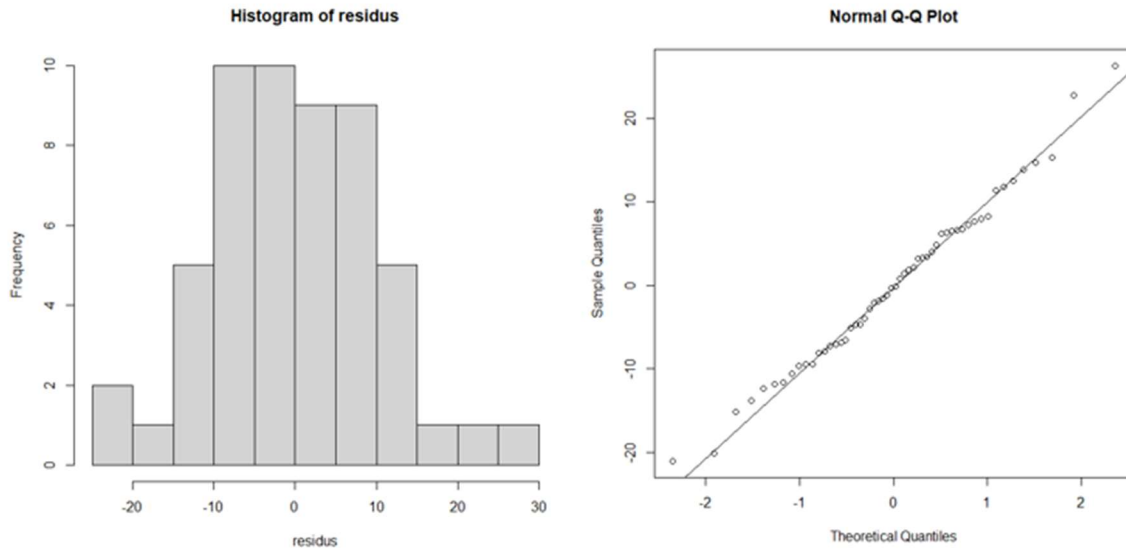


Figure 5.31 : Histogramme des résidus de l'ANOVA et diagramme Quantile-Quantile

Au-delà de l'observation graphique de la normalité des résidus, le test de normalité de Shapiro-Wilk permet d'obtenir un résultat chiffré rigoureux pour confirmer les hypothèses nécessaires à la validité de l'ANOVA (Shapiro & Wilk, 1965).

Le test de Shapiro-Wilk réalisé sur les résidus donne un $W = 0,98913$ et une p-value de $0,9043$, indiquant que l'hypothèse de normalité ne peut être rejetée. Les résidus suivent donc une distribution normale. Une valeur W proche de 1 signifie que les valeurs suivent bien une loi normale. Une p-value en dessous d'un seuil généralement fixé à $0,05$ signifieraient le rejet de l'hypothèse nulle selon laquelle les valeurs suivent une loi normale. Ici, cela est loin d'être le cas. La normalité peut donc bel et bien être admise.

Enfin, la Figure 5.32 permet de vérifier l'homoscédasticité des résidus, c'est-à-dire que leur disposition ne présente pas de structure particulière (Field, 2024). Le cas contraire aurait suggéré l'oubli d'une variable considérée à priori inutile. Ici, l'homoscédasticité peut être admise car le nuage de points ne présente pas de structure visible (pas de cône ni de motif particulier) et la dispersion des résidus semble relativement constante tout au long de la droite de régression.

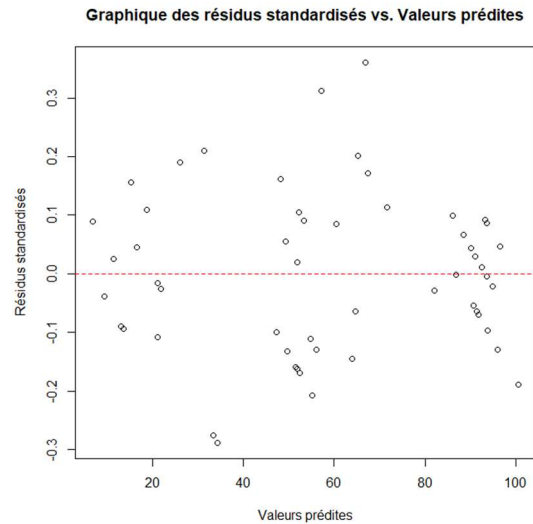


Figure 5.32 : Graphique d'homoscédasticité des résidus

5.4.4.3 Régression linéaire avec interactions et modèle

La quantité totale d'indicateurs stigmergiques n'ayant, selon l'ANOVA, pas un effet statistiquement significatif, elle a été retirée de la régression linéaire présentée dans le Tableau 5.3 à des fins de simplification du modèle. Une régression linéaire (Draper & Smith, 1998) prenant en compte les interactions des facteurs permet d'obtenir un modèle d'estimation de la variable **Pourcentage** en fonction des niveaux de facteurs. Deux coefficients sont statistiquement significatifs : l'intercept qui correspond à la valeur dans le cas où tous les effets des facteurs sont nuls et **Couleur.K.positif**. L'estimation de l'interaction entre la couleur et la proportion de retours connus est également statistiquement significative de telle manière que plus la proportion de retours connus (c'est-à-dire d'indicateurs colorés) sera importante moins la couleur aura d'effet.

Tableau 5.3 : Résultats de la régression linéaire pour la variable **Pourcentage**

	Estimation	Erreur standard	t-value	p-value
Intercept	46,5	5,5	8,4	$7,23^{-11}$ ***
Couleur.K.positif	48,7	6,8	7,2	$4,60^{-09}$ ***
Prop.K	12,2	8,9	1,4	0,1783
Diff.Q	1,5	1,4	1,1	0,2975
Couleur.K.positif:Prop.K	-22,8	10,9	-2,1	0,0423 *
Couleur.K.positif:Diff.Q	-2,4	1,7	-1,4	0.1772

Prop.K:Diff.Q	0,3	2,3	0,1	0,8967
Couleur.K.positif:Prop.K:Diff.Q	2,7	2,8	1	0,3405
Codes de significativité : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '' 1				
Erreur standard résiduelle : 12,03 sur 46 degrés de liberté				
R carré multiple : 0.8681, R carré ajusté : 0.848				
Statistique F : 43.25 avec 7 paramètres et 46 degrés de liberté, p-value : < 2,2 ⁻¹⁶				

Le coefficient de détermination (R carré) est de 0,8681, ce qui est relativement élevé sachant qu'il est compris entre 0 et 1 et que 0 signifierait que le modèle n'explique aucunement la variance, et 1 que le modèle explique la totalité (Cohen et al., 2013). Il exprime la proportion de la variance expliquée par le modèle pour la variable dépendante, ici **Pourcentage**, c'est-à-dire la sélection du choix référence.

$$\widehat{\text{Pourcentage}} = 46.4639 + 48.6672 \times C + 12.1817 \times P + 1.4856 \times D \\ - 22.7929 \times C \times P - 2.3663 \times C \times D + 0.2971 \times P \times D \\ + 2.6846 \times C \times P \times D$$

Avec :

- $\widehat{\text{Pourcentage}}$ = Estimation de Pourcentage,
- C = **Couleur.K.positif**,
- P = **Prop.K**,
- D = **Diff.Q**.

Tout comme pour l'ANOVA la régression linéaire, pour être pertinente, admet les hypothèses de normalité des résidus et d'homoscédasticité des résidus. Une vérification de ces hypothèses a donc été effectuée à nouveau étant donné que le facteur de quantité totale (**Tot.Q**) a été supprimé. Sur la Figure 5.33, en premier lieu la normalité des résidus est vérifiée graphiquement à l'aide de l'histogramme de répartition des résidus et du Q-Q plot présentés ci-dessous. L'histogramme présente approximativement une répartition en forme de cloche ce qui s'approche d'une loi normale. Le Q-Q plot montre que les valeurs mesurées suivent approximativement les valeurs théoriques représentées par la droite.

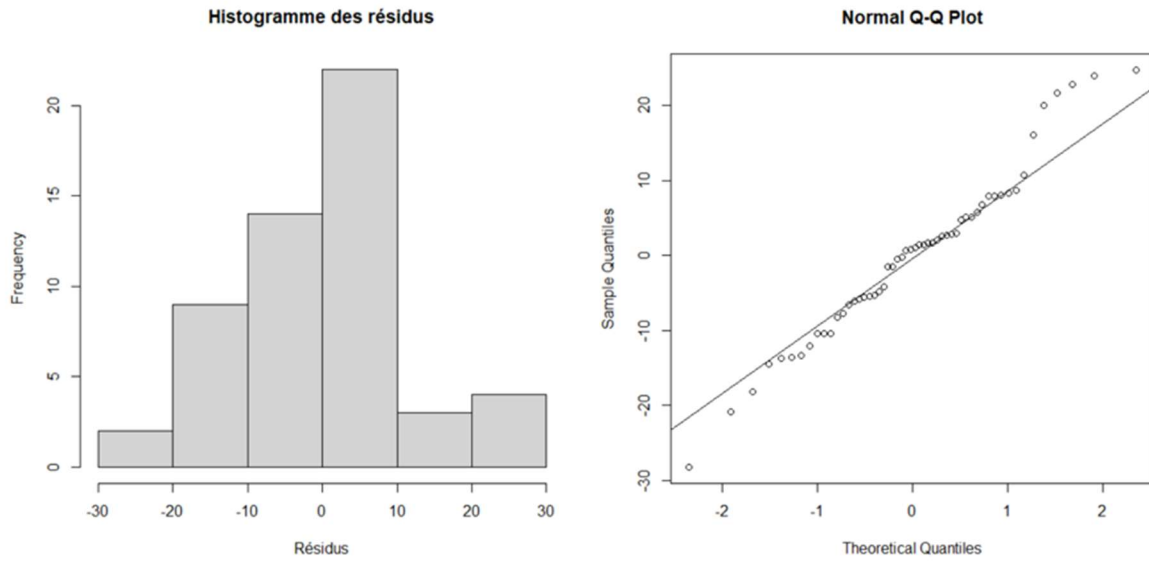


Figure 5.33 : Histogramme des résidus de l'ANOVA et diagramme Quantile-Quantile

Le test de Shapiro-Wilk appliqué aux résidus donne un $W = 0,9756$ et une p -value de $0,3353$. La normalité des résidus peut être admise. Sur la Figure 5.34 des résidus standardisés, aucune structure particulière n'apparaît et les valeurs sont réparties dans toutes les zones, l'homoscédasticité est donc vérifiée. Les conditions nécessaires à la validité de la régression linéaire sont donc réunies.

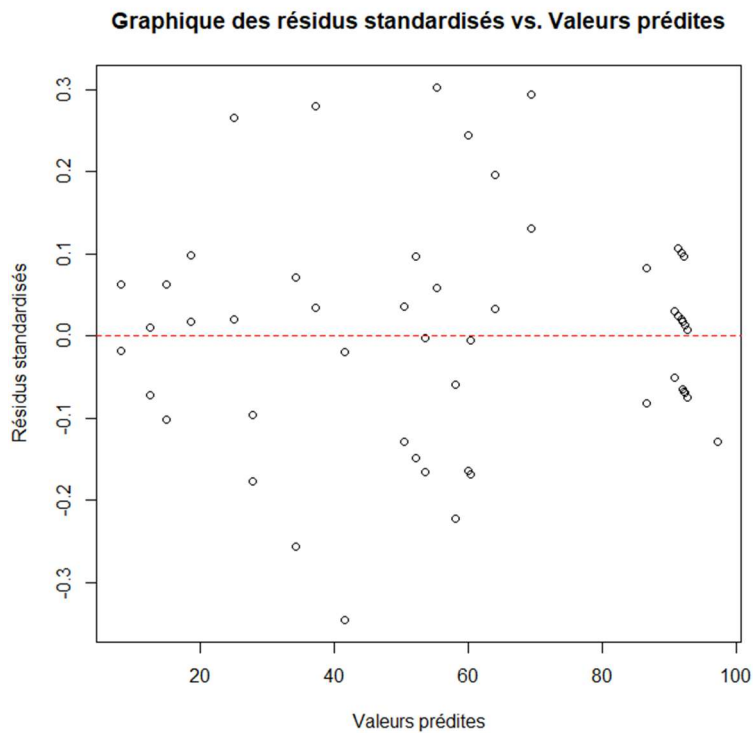


Figure 5.34 : Graphique d'homoscédasticité des résidus

5.4.5 Analyse du temps de choix

Cette partie présente les résultats des analyses statistiques de la variable **Temps** représentant le temps moyen (en secondes) mis par les utilisateurs pour sélectionner un choix, qu'il s'agisse du choix référence ou non.

5.4.5.1 Description

Les diagrammes sur la Figure 5.35 présentent les moyennes de **Temps** pour chaque facteur (voir la Section 5.4.1.2.1 sur les variables étudiées pour le détail de chaque facteur). Pour chaque facteur, plusieurs niveaux ont été expérimentés. Les facteurs ont été combinés entre eux. L'impact des facteurs sur le temps de choix ne semble pas si marqué que sur le choix en lui-même. De plus ce ne sont pas les mêmes facteurs qui semble impacter le plus le temps. Cela dit, les effets visibles ne sont pas surprenants. La couleur des indicateurs semble, sans surprise, faciliter le choix (et donc raccourcir le temps de décision) lorsqu'elle pousse à sélectionner le choix référence ou l'autre. Lorsqu'elle ne montre pas de retour plus positif d'un côté que de l'autre, le temps de choix est plus important. Concernant la proportion de retours connus (facteur **Prop.K**), le temps de choix est en moyenne légèrement plus court lorsqu'un indicateur sur trois est coloré que lorsqu'un indicateur sur cinq ou tous les indicateurs sont colorés. Leur analyse est peut-être rendue plus aisés par cette proportion. Les facteurs suivants présentent des différences plus évidentes. Avec le facteur **Diff.Q**, il apparait nettement que plus la quantité d'indicateurs est différente entre un côté et l'autre (quantité plus importante du côté référence lorsqu'il y a disproportion) plus le choix est rapide. Avec le facteur **Tot.Q**, le temps de décision est plus important lorsque la quantité totale d'indicateurs est plus importante. Pour confirmer cela de manière statistiquement rigoureuse, une analyse des effets et interactions est présentée dans la partie suivante.

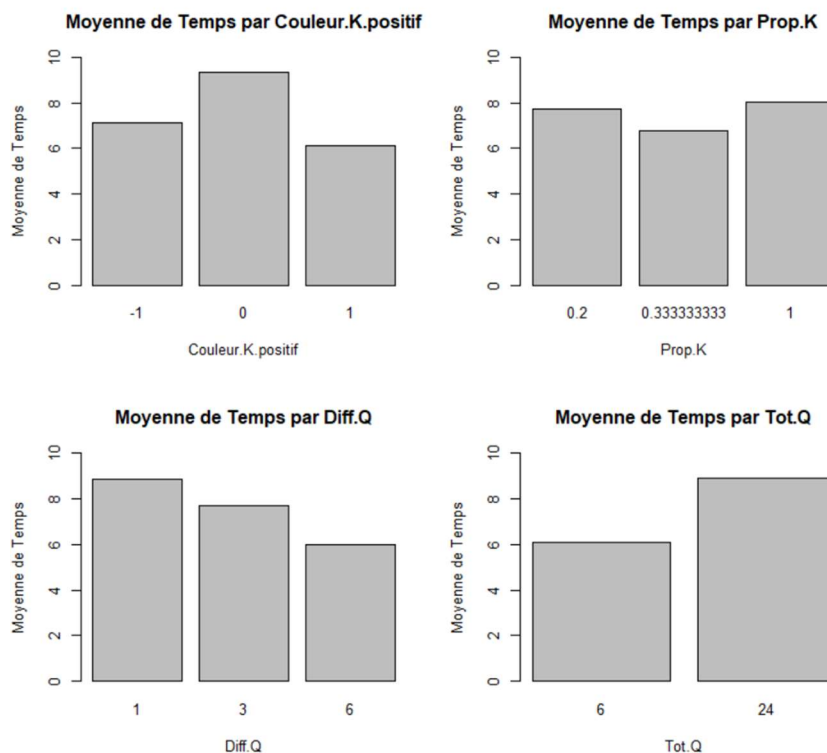


Figure 5.35 : Moyennes de la variable Temps pour chaque facteur

5.4.5.2 Analyse de variances du logarithme et interactions

Comme vu précédemment, pour qu'une analyse des variances soit pertinente, certaines hypothèses doivent être vérifiées. La normalité et l'homoscédasticité des résidus doivent être observées. Dans le cas présent, une transformation de la variable Temps a dû être effectuée afin d'adapter les données et de respecter les conditions nécessaires à cette analyse. En effet, la distribution initiale des données présentait une forte asymétrie positive, ce qui enfreignait l'hypothèse de normalité des résidus. Une fonction logarithme népérien a donc été appliquée sur la variable **Temps**, conformément aux recommandations courantes dans l'analyse de données asymétriques (Osborne, 2010).

Le Tableau 5.4 des résultats de l'ANOVA montre deux variables explicatives du temps statistiquement significatives : **Diff.Q** (la différence de quantité d'indicateurs entre les deux choix) et **Tot.Q** (la quantité globale d'indicateurs). Sans surprise, comme observé précédemment, ce sont les deux facteurs dont l'impact est le plus clair. Deux types d'interactions sont notables. Par ordre de significativité : **Prop.K:Couleur.K.positif** et **Prop.K:Diff.Q:Tot.Q:Couleur.K.positif**.

La représentation des interactions s'avère plus complexe. La Figure 5.36 est un graphique conditionnel avec facettes pour l'interaction complexe. Il représente directement toutes les combinaisons de niveaux de tous les facteurs. Les facettes sont créées pour chaque niveau de **Diff.Q** croisé avec chaque niveau de **Tot.Q** et **Couleur.K.positif**. L'abscisse représente les niveaux de **Prop.K** et l'ordonnée le logarithme du temps. Les points représentent les observations de données et la ligne bleue la tendance. Ainsi, il est possible d'observer toutes les interactions. Par exemple, le choix est bien plus rapide lorsque **Diff.Q** et **Couleur.K.positif** concordent (lorsque la quantité d'indicateurs est plus importante sur le choix référence et la couleur appelle à sélectionner le choix référence) que lorsqu'ils sont « contradictoires » (la quantité est du côté du choix référence tandis que la couleur indique des retours plus positifs sur l'autre choix). Concrètement, dans le cas où tous les retours sont connus (pastilles rouges ou vertes et non grises), quand il y a six fois plus d'indicateurs sur le choix référence avec une grande quantité totale (24 contre 4 sur l'autre choix) et que la couleur y est positive (plus de verts sur ce choix / rouges sur l'autre choix), les participants mettent en moyenne environ 2,7 secondes à effectuer leur choix. Quand, au contraire, dans les mêmes conditions, il y a toujours six fois plus d'indicateurs sur le choix référence mais que la couleur est négative (plus de rouges sur ce choix / verts sur l'autre), les participants mettent en moyenne 9 secondes.

Tableau 5.4 : Résultats de l'ANOVA des variables indépendantes sur la variable Temps

	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur F	Pr(>F)
Prop.K	1	0,001	0,0007	0,006	0,94000
Diff.Q	1	1,126	1,1259	9,153	0,00444 **
Tot.Q	1	1,372	1,3720	11,155	0,00189 **
Couleur.K.positif	1	0,222	0,2221	1,806	0,18697
Prop.K:Diff.Q	1	0,308	0,3078	2,502	0,12196
Prop.K:Tot.Q	1	0,005	0,0052	0,043	0,83771
Diff.Q:Tot.Q	1	0,198	0,1984	1,613	0,21183
Prop.K: Couleur.K.positif	1	0,509	0,5090	4,138	0,04895 *
Diff.Q : Couleur.K.positif	1	0,228	0,2276	1,851	0,18172
Tot.Q : Couleur.K.positif	1	0,008	0,0082	0,067	0,79780
Prop.K:Diff.Q:Tot.Q	1	0,311	0,3112	2,530	0,11996
Prop.K:Diff.Q: Couleur.K.positif	1	0,153	0,1533	1,246	0,27132
Prop.K:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	0,092	0,0915	0,744	0,39382
Diff.Q:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	0,068	0,0680	0,553	0,46183
Prop.K:Diff.Q:Tot.Q: Couleur.K.positif	1	0,388	0,3879	3,153	0,08379 .
Résidus	38	4,674	0,1230		
Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1					

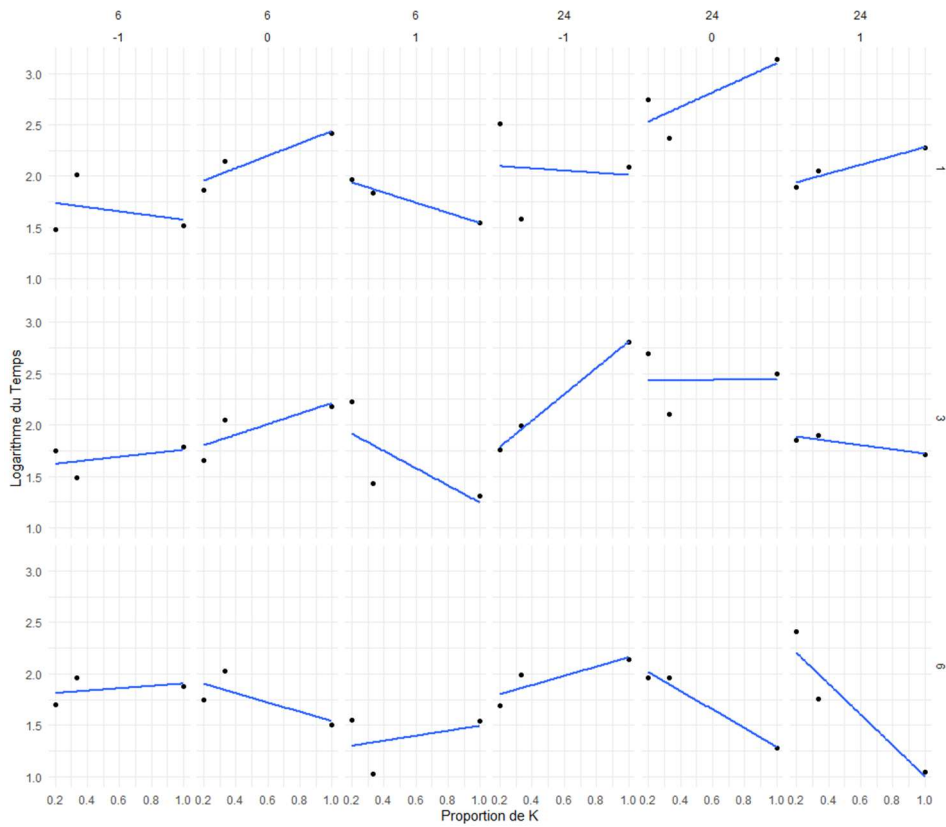


Figure 5.36 : Graphique conditionnel à facettes des interactions des facteurs sur **Temps**

À nouveau, la normalité des résidus est vérifiée afin de s'assurer de la validité de l'ANOVA. Visuellement, sur la Figure 5.37, l'histogramme montre qu'ils s'approchent d'une loi normale et le Q-Q plot montre que les valeurs mesurées suivent les valeurs théoriques de manière satisfaisante.

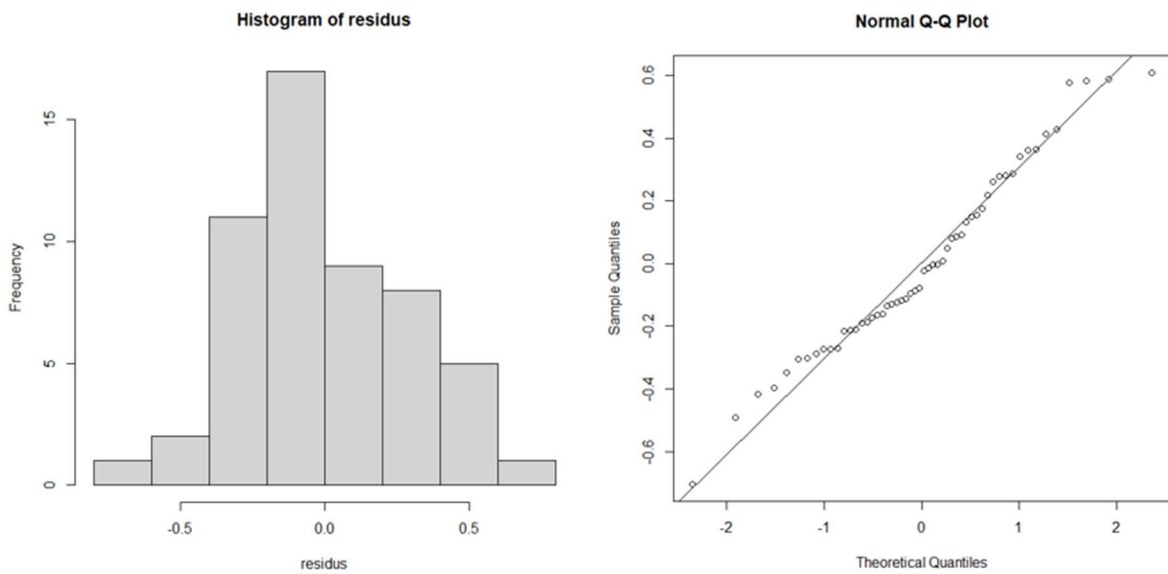


Figure 5.37 : Histogramme des résidus de l'ANOVA et diagramme Quantile-Quantile

Pour chiffrer cela, voici les résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk sur les résidus : $W = 0,97431$, $p\text{-value} = 0,2962$. La valeur W est proche de 1 ce qui correspond à une bonne correspondance à la normalité, et la $p\text{-value}$ est supérieur à un seuil de 0,05. L'hypothèse nulle de normalité n'est donc pas rejetée et elle peut être admise. L'homoscédasticité des résidus est également observée sur le graphique des résidus standardisés en Figure 5.38. Les hypothèses nécessaires à la validité de l'ANOVA sont donc vérifiées.

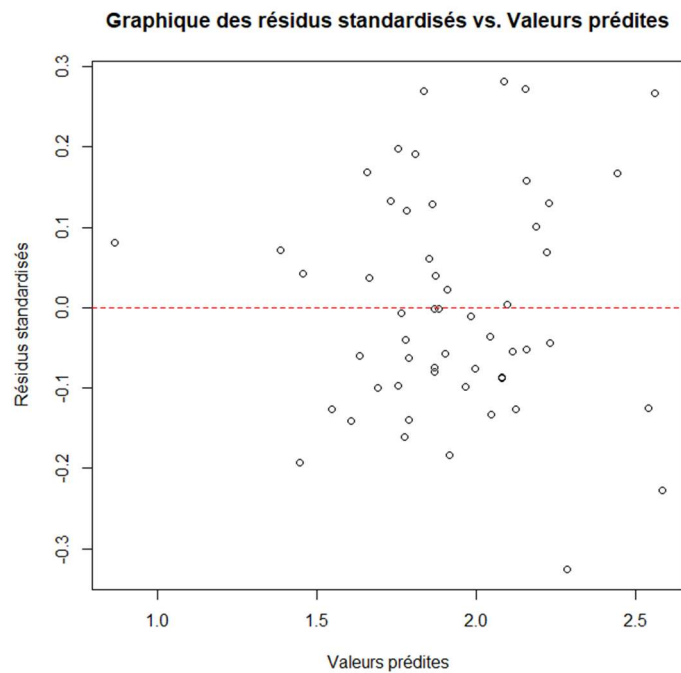


Figure 5.38 : Graphique d'homoscédasticité des résidus

5.4.5.3 Régression linéaire du logarithme avec interactions et modèle

Cette régression linéaire présentée dans le Tableau 5.5 est toujours effectuée sur le logarithme de la variable dépendante Temps. Cela sera simplement intégré dans le modèle obtenu par cette régression. Cependant, le modèle n'explique pas toutes les variances, avec une valeur de R carré ajusté de 0,33. Dans le cas du modèle portant sur le temps de décision (log-transformé), aucune variable explicative ne ressort comme significative au seuil de $\alpha = 0.05$ de manière isolée. Toutefois, leur conservation se justifie par l'absence de signal statistique suffisamment fort pour guider une simplification, ainsi que par la nature transformée de la variable dépendante : le passage au logarithme, s'il permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes, tend également à lisser les effets individuels. Par ailleurs, contrairement au modèle de choix où certaines variables dominant clairement l'explication, le modèle du temps vise davantage à capturer une dynamique contextuelle globale, où les effets potentiellement faibles ou diffus peuvent s'additionner. Dans ce cadre, maintenir l'ensemble des facteurs permet de ne pas exclure prématurément des influences subtiles qui pourraient jouer un rôle dans les temporalités collectives de décision.

Tableau 5.5 : Résultats de la régression linéaire pour le logarithme de la variable Temps

	Estimation	Erreur standard	t-value	p-value
Intercept	1,877046	0,312902	5,999	5,7 ⁻⁰⁷ ***
Couleur.K.positif	0,499282	0,383225	1,303	0,2005
Prop.K	-0,293765	0,505139	-0,582	0,5643
Diff.Q	-0,057383	0,079908	-0,718	0,4771
Tot.Q	0,007053	0,017887	0,394	0,6956
Couleur.K.positif:Prop.K	-0,599126	0,618666	-0,968	0,3390
Couleur.K.positif:Diff.Q	-0,150526	0,097867	-1,538	0,1323
Prop.K:Diff.Q	0,070967	0,129001	0,550	0,5855
Couleur.K.positif:Tot.Q	-0,028651	0,021908	-1,308	0,1988
Prop.K:Tot.Q	0,042227	0,028877	1,462	0,1519
Diff.Q:Tot.Q	0,002718	0,004568	0,595	0,5553
Couleur.K.positif:Prop.K:Diff.Q	0,149836	0,157993	0,948	0,3489
Couleur.K.positif:Prop.K:Tot.Q	0,037454	0,035367	1,059	0,2963
Couleur.K.positif:Diff.Q:Tot.Q	0,010547	0,005595	1,885	0,0671
Prop.K:Diff.Q:Tot.Q	-0,011731	0,007374	-1,591	0,1200
Couleur.K.positif:Prop.K:Diff.Q:Tot.Q	-0,016038	0,009032	-1,776	0,0838
Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1				
Erreur standard résiduelle : 0,3507 sur 38 degrés de liberté				
R carré multiple : 0,5163, R carré ajusté : 0,3253				
Statistique F : 2,704 avec 15 paramètres et 38 degrés de liberté, p-value : 0,006677				

$$\begin{aligned} \log(\widehat{\text{Temps}}) = & 1.877046 + 0.499282 \times C - 0.293765 \times P - 0.057383 \times D \\ & + 0.007053 \times T - 0.599126 \times C \times P - 0.150526 \times C \times D \\ & + 0.070967 \times P \times D - 0.028651 \times C \times T + 0.042227 \times P \times T \\ & + 0.002718 \times D \times T + 0.149836 \times C \times P \times D \\ & + 0.037454 \times C \times P \times T + 0.010547 \times C \times D \times T \\ & - 0.011731 \times P \times D \times T - 0.016038 \times C \times P \times D \times T \end{aligned}$$

Avec :

$$- \log(\widehat{\text{Temps}}) = \text{Estimation du logarithme du Temps},$$

- $C = \text{Couleur. } K. \text{ positif,}$
- $P = \text{Prop. } K,$
- $D = \text{Diff. } Q,$
- $T = \text{Tot. } Q.$

5.4.6 Impact temporel des indicateurs stigmergiques

Une expérience supplémentaire a été menée pour observer une dimension d'évolution temporelle de l'influence des indicateurs stigmergiques. Par évolution temporelle, il est entendu l'évolution par pas de temps qui correspondent chacun à une prise de décision par un utilisateur, sur la base des indicateurs générés par les décisions prises par les utilisateurs précédents. Afin de tester la robustesse de ce système stigmergique aux erreurs, des cas représentant une erreur ont été présentés au premier utilisateur, comme expliqué plus en détail dans la partie sur les protocoles. Ainsi, il est possible d'observer combien de personnes ont été induites en erreur à la suite de cet indicateur initial erroné, sachant qu'il n'y a aucune autre information contextuelle aidant à la décision. Aussi, un indicateur sur trois sera coloré pour l'utilisateur suivant et indiquera donc le résultat tandis que les autres resteront gris. Trois paires (contenant chacune un cas avec un faux positif comme indicateur initial et un cas avec un faux négatif) sont testées. Les cas de la première paire (Cor1 et Cor2) génèrent des indicateurs ne persistant qu'un pas de temps. C'est-à-dire que l'indicateur généré par la décision d'un utilisateur n n'apparaîtra que pour l'utilisateur $n+1$ mais ne sera plus visible pour l'utilisateur $n+2$. Les cas de la deuxième paire (Cor3 et Cor4) génèrent des indicateurs qui persistent durant trois pas de temps. Les cas de la troisième paire (Cor5 et Cor6) génèrent des indicateurs perpétuels. Ils s'accumulent et ne disparaissent jamais.

Ces trois durées de persistance — courte (1), moyenne (3), et longue (infinie) — ont été choisies de manière exploratoire pour simuler différents régimes de mémorisation du système et observer leur impact respectif sur la robustesse stigmergique. Le choix de ces valeurs repose sur un compromis entre simplicité expérimentale et différenciation suffisante des dynamiques observables. D'autres durées auraient pu être testées, mais ces trois cas permettent déjà de couvrir un spectre allant de la volatilité maximale à la mémoire cumulative.

Ce principe est en accord avec des travaux (Hunt et al., 2019) menés sur des essaims robotiques, où la vitesse de décroissance d'un signal stigmergique (analogue à une trace de phéromone) est identifiée comme un paramètre déterminant : lorsque la trace persiste trop longtemps, elle peut créer un bruit informationnel nuisible à la coordination, tandis qu'une décroissance plus rapide améliore la performance collective, notamment à haute densité. Cette trace continue avec un taux de décroissance a été réadaptée par des seuils discrets.

À l'observation des erreurs cumulées résultantes des dix décisions successives sur la Figure 5.39, il apparaît que les cas de la deuxième paire Cor3 et Cor4 ont engendré moins d'erreurs. Les cas ayant engendré le plus d'erreurs sont Cor5 et Cor6, correspondant aux indicateurs perpétuels. Cor1 et Cor2 semblent approximativement correspondre au hasard puisqu'une erreur a été faite à peu près une fois sur deux.

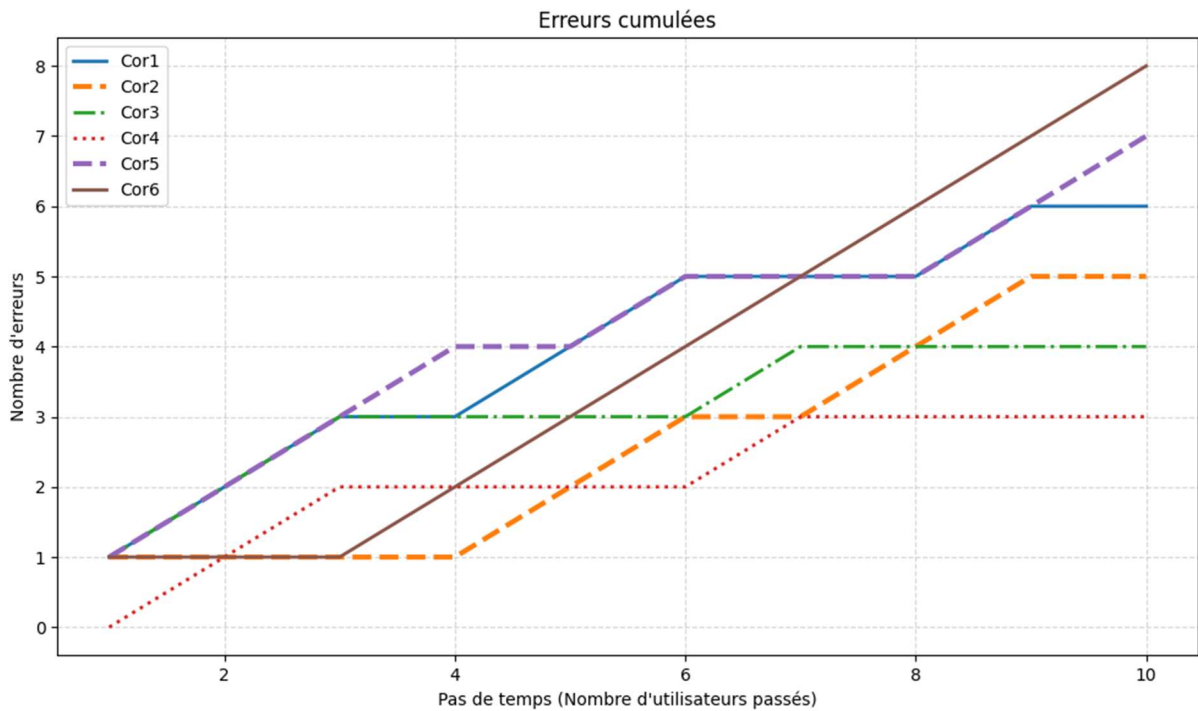


Figure 5.39 : Diagramme des erreurs cumulées de l'expérience des indicateurs stigmergiques corrélés entre les utilisateurs

Ces résultats, présentés différemment en Figure 5.40, suggèrent que l'hypothèse selon laquelle un juste niveau de persistance des indicateurs stigmergiques permet d'améliorer les décisions se vérifie. Dans ce contexte, les résultats peuvent laisser penser qu'un juste milieu dans le niveau de persistance des indicateurs (assez persistants mais pas perpétuels) améliore les décisions. Cor1 et Cor2, avec un indicateur ne persistant qu'un pas de temps, peuvent être interprétés comme ne permettant pas un apprentissage collectif sur les retours d'expérience et Cor5 et Cor6 comme induisant trop longtemps en erreur. Cor3 et Cor4 quant à eux semblent permettre un apprentissage tout en ne permettant pas aux erreurs de perdurer et induire un nombre trop important d'utilisateurs en erreur.

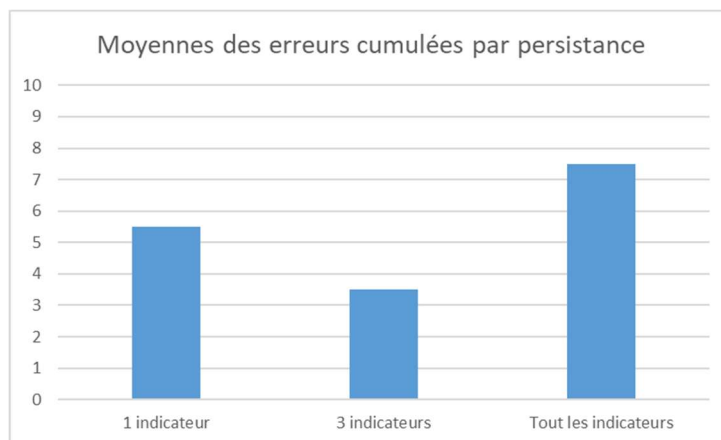


Figure 5.40 : Moyennes des erreurs cumulées en fonction de la persistance des indicateurs stigmergiques

Pour cette expérience supplémentaire sur les indicateurs corrélés entre les utilisateurs, le langage employé est prudent car la quantité de données collectées n'est pas assez importante pour que les résultats soient statistiquement significatifs. Ces résultats doivent donc être vus comme une piste intéressante à explorer et vérifier plutôt que comme une preuve.

5.4.7 Cognition collective

Cette partie présente l'analyse de la cognition collective, qui peut être assimilée à l'intelligence collective. Elle repose sur la Group Cognitive Scale (CCS), questionnaire détaillé dans le protocole, qui fonctionne sur le même principe que le SUS. Contrairement au SUS, le CCS n'était pas existant dans la littérature scientifique et a été créé spécifiquement pour ces expériences. En effet, il vise à combler un besoin d'évaluation de l'amélioration de l'intelligence collective par un système. Aucun outil existant n'était parfaitement adapté à cela. La plupart des éléments que l'utilisateur doit noter sont inspirées de tests visant à détecter des problèmes cognitifs chez un individu réadaptés pour un groupe, sous forme d'affirmations. Certains ont été conçus pour y ajouter des évaluations spécifiques à une organisation.

Comme expliqué dans la partie sur le protocole, chaque sujet des expériences répond à un CCS avant l'ensemble des expériences d'après ce qu'il sait et connaît en l'état actuel de l'entreprise, puis à un autre, identique, après les expériences (CCS1 puis CCS2). Il répond à ce dernier en s'imaginant l'entreprise avec le système testé fonctionnel et à disposition.

Les résultats du Tableau 5.6, dont le mode de calcul est le même que pour le SUS, montrent que chaque utilisateur a ressenti, d'après ses réponses, que la cognition collective serait améliorée par ce système de prise de décision collaborative.

Tableau 5.6 : Notes finales avant (CCS1) et après (CCS2) les expériences au CCS pour chaque utilisateur

Utilisateur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
GCS1	65	45	67,5	75	67,5	37,5	50	45	60	65	82,5	45	52,5	75	52,5
GCS2	82,5	90	75	90	70	62,5	67,5	57,5	67,5	72,5	90	90	87,5	90	95

Les histogrammes de la Figure 5.41 montrent que la répartition des notes se décale nettement vers la droite après les expériences par rapport à avant.

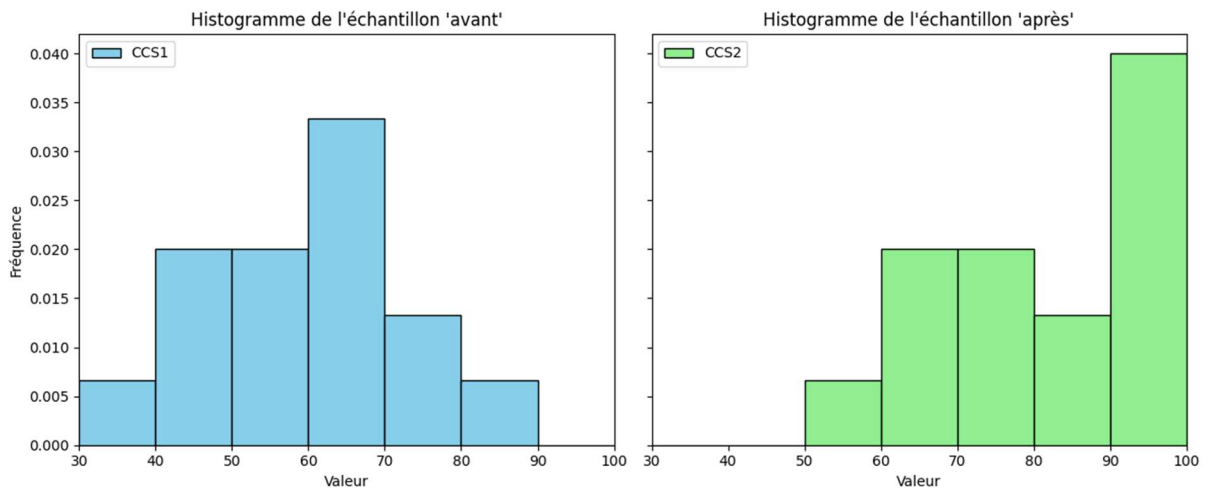


Figure 5.41 : Histogrammes de répartition des résultats finaux aux CCS

Les boîtes à moustaches de la Figure 5.42 montrent bien cette augmentation des notes qui se placent sur une échelle de 0 à 100 et peuvent être interprétées sur la même échelle que pour le SUS. La moyenne du CCS1 est de 59 (représentée par la croix) et sa médiane de 60 (représentée par le trait horizontal) tandis que la moyenne du CCS2 est de 79,2 et sa médiane de 82,5.

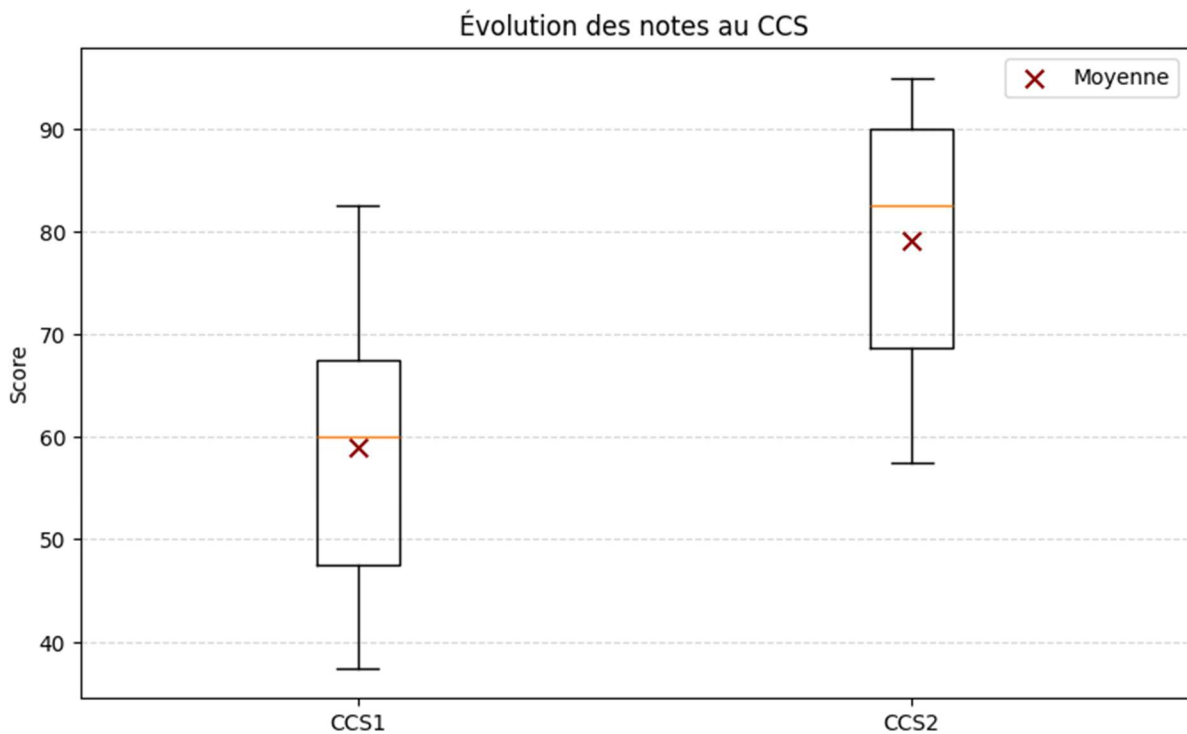


Figure 5.42 : Boîtes à moustaches de répartition des résultats finaux aux CCS

Les boîtes à moustaches qui agrègent les données ne permettent cependant pas d’observer l’amélioration du résultat pour chaque utilisateur. En effet, un utilisateur pourrait avoir eu un résultat plus élevé au CCS1 qu’au CCS2 sans que cela soit visible. Le diagramme en barre de la Figure 5.43 sépare donc les résultats de chaque individu afin de visualiser cela.

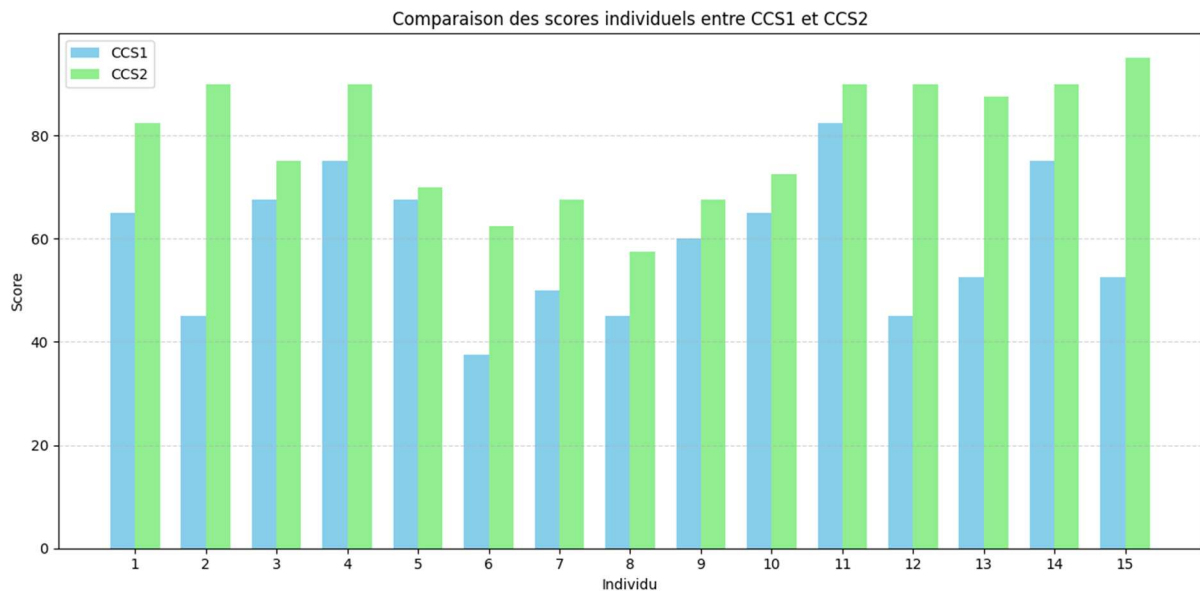


Figure 5.43 : Graphique en barres des notes finales aux CCS pour chaque utilisateur

La forme des histogrammes de la Figure 5.41 montre que les données ne suivent pas vraiment une loi normale, en particulier concernant les résultats au CCS2. Pour vérifier que l’évolution des notes est bien statistiquement significative, un test statistique non paramétrique est donc appliqué. Il s’agit du test de Wilcoxon rangé signé dont voici les résultats : $V = 0$, $p\text{-value} = 0,0007034$. Il s’agit d’un test statistique non paramétrique, c’est-à-dire moins sensible à la normalité des données, et destiné à des jeux de données appariés. C’est le cas des résultats au CCS (il s’agit du même utilisateur qui a répondu au CCS1 et au CCS2 et a obtenu ces résultats). Le résultat signifie que l’hypothèse nulle selon laquelle il n’y a pas de différence dans les résultats est rejetée (du moins au seuil $\alpha = 0.05$) car la probabilité d’obtenir de tels résultats ($p\text{-value}$) dans ce cas est infime. L’hypothèse alternative est donc adoptée : la différence de résultats n’est pas nulle. La limite de ce test est qu’il est impossible de calculer la $p\text{-value}$ exacte avec des ex-aequo mais ce n’est pas le cas ici.

5.5 Synthèse et discussion

Les résultats obtenus offrent des réponses intéressantes aux questions de recherches et aux différentes hypothèses qui en découlent. Cette partie présente ce qui résulte de ces expériences en reprenant une à une les questions de recherche et les hypothèses.

SO1 : Le système général a une bonne utilisabilité.

L'évaluation au SUS dont le résultat moyen est de 80 indique une très bonne acceptabilité du système. D'un point de vue qualitatif il est ressorti par les remarques des participants qu'il a été bien accueilli dans l'ensemble et son intérêt bien compris. D'un point de vue plus quantitatif, les actions nécessaires lors des différentes étapes des scénarios suivis par les participants ont été dans leur grande majorité menées à bien. Les points d'amélioration ont concerné la forme des fonctionnalités à disposition plutôt que leur finalité.

SO2 : La cognition collective est améliorée avec l'utilisation de ce système.

La cognition collective a été évaluée grâce au CCS élaboré sur le même principe que le SUS. L'évolution des résultats de chaque utilisateur avant les expériences et après les expériences montre une nette amélioration de la cognition collective.

Objectif 1 : Le système d'aide à la prise de décision collaborative proposé aide-t-il dans un contexte de maintenance des moteurs d'hélicoptère ?

Concernant ce premier objectif, il peut être conclu que le système proposé aide à la prise de décision collaborative, notamment en décloisonnant de manière plus formelle et systématique les différents métiers, et en simplifiant l'exploitation des retours d'expérience. Cela est vérifié par la confirmation en particulier des hypothèses de recherche SO1 et SO2 évoqué ci-dessus.

SO3 : Les indicateurs stigmergiques aident à transmettre de l'information issue de l'expérience.

Des améliorations possibles ont été évoquées par les participants comme des **Pourcentages** à la place des pastilles colorées accumulées pour rendre l'information plus concise. Ce sont des pistes d'exploration possibles, mais en tenant compte des changements d'impacts éventuels que cela peut occasionner. Concernant les indicateurs tels que proposés dans ces expériences, les utilisateurs se sont effectivement transmis de l'information via ces indicateurs sans autre forme de communication. Leur composition et la manière dont ils sont présentés peut influencer sur leur efficacité et la manière dont ils peuvent aider les utilisateurs. C'est ce qui est détaillé en traitant les hypothèses suivantes.

SO4 : Le choix est influencé par la couleur, proportion de couleur, quantité totale, quantité relative des indicateurs stigmergiques.

La couleur des indicateurs est leur caractéristique prépondérante dans la prise de décision pour les utilisateurs qui s'y fient. Ensuite viennent la proportion de retours connus (indicateurs colorés par rapport aux indicateurs gris) et la différence de quantité d'indicateurs entre le choix référence et le choix alternatif. Après la couleur des indicateurs une quantité plus importante sur l'un des choix tend à le faire sélectionner par l'utilisateur. Une interaction entre la couleur des indicateurs et la proportion de connaissances (c'est-à-dire d'indicateurs colorés) a été constatée. Plus la proportion de connaissances est importante et moins la couleur des indicateurs influe sur le choix. La proportion de connaissances tend donc à modérer l'impact de la couleur des indicateurs. Ceci suggère que l'utilisateur se fie à plusieurs facteurs simultanément dans sa prise de décision. Concernant le choix effectué, la quantité totale d'indicateurs ne semble pas jouer un rôle important. Dans cette expérience, les couleurs des indicateurs sont gris, rouges et verts. Cela peut occasionner des difficultés pour des utilisateurs daltoniens. Il existe plusieurs types de daltonisme, mais la distinction des couleurs lumineuses rouge et verte pose souvent des difficultés. Pour éviter ces difficultés et une perte de temps dans leur analyse, d'autres couleurs comme le jaune et bleu peuvent être utilisées, ou d'autres caractéristiques comme la forme pour ne pas perdre en affordance en conservant des codes couleurs courants.

SO5 : Le temps de décision est influencé par la couleur, proportion de couleur, quantité totale, quantité relative des indicateurs stigmergiques.

Le temps de décision est mesuré car il permet d'objectiver la difficulté à prendre une décision en supposant que plus la décision est chronophage et plus elle est difficile. Or, la facilité du processus de décision est un aspect important à prendre en compte quant à l'acceptabilité du système. En effet l'intégration de tels indicateurs dans de nombreux contextes et processus décisionnels rendra son coût en temps et en énergie non négligeable. Concernant les résultats des expériences, contrairement au choix en lui-même, les facteurs qui ont un impact le plus statistiquement significatif sur le temps pris pour faire ce choix sont la différence de quantité d'indicateurs entre le choix référence et le choix alternatif ainsi que la quantité totale des indicateurs. En effet sans surprise une quantité totale d'indicateurs plus élevée augmente le temps de décision. Au contraire, une forte disproportion de quantités d'indicateurs entre le choix référence et le choix alternatif tend à accélérer le processus de prise de décision.

SO6 : La juste persistance des indicateurs stigmergiques permet de rendre leur influence sur les décisions robuste aux erreurs.

L'expérience supplémentaire portant sur les indicateurs dépendant des réponses des utilisateurs précédents semble suggérer qu'une persistance de 3 pas de temps permet de diminuer l'impact d'une erreur. Au contraire les indicateurs qui ne persistent que pour un pas de temps ne permettent pas un apprentissage inter-utilisateur. De même des indicateurs perpétuels induisent un nombre important d'erreurs à la suite d'une information erronée. Dans cette expérience, un indicateur sur trois est coloré et communique une information sur le résultat du choix correspondant. Ce choix d'une issue connue sur trois a été fait dans un souci de réalisme vis-à-vis des cas réels observés. Cette fréquence est à prendre en compte et l'efficacité de la persistance d'une durée de 3 pas de temps doit y être associée. Un changement dans la fréquence des retours connus peut modifier le nombre optimal de pas de temps nécessaires.

Il conviendrait donc d'explorer plus systématiquement différentes modalités de persistance (par exemple 2, 4, 5 pas de temps) ainsi que plusieurs niveaux d'information disponible (quantité variable de pastilles grises) afin de mieux caractériser l'effet combiné de ces deux paramètres. Une telle exploration permettrait d'envisager la construction d'un modèle prédictif capable d'estimer la persistance optimale en fonction de la qualité des données disponibles, c'est-à-dire du degré de complétude des retours issus des choix antérieurs. Ce modèle pourrait ainsi guider dynamiquement le système dans le réglage de la persistance des indicateurs stigmergiques selon le contexte informationnel, maximisant leur robustesse aux erreurs tout en maintenant leur efficacité collective.

Objectif 2 : Un indicateur stigmergique peut-il améliorer l'intelligence collective en guidant vers les bonnes décisions ?

La réponse à ce deuxième objectif semble également positive et étayée par les réponses en particulier aux hypothèses de recherche 3 à 6 (SO3, SO4, SO5 et SO6) traitées ci-dessus.

Conclusion

Les systèmes sociotechniques complexes que sont les grandes organisations telles que celles impliquées dans des activités de maintenance de moteurs d'hélicoptères, sont difficiles, si ce n'est impossible, à appréhender par une seule des parties prenantes. Pour faire unité dans une cohérence globale malgré le nombre important d'acteurs et la complexité de l'activité, un outil médiateur est nécessaire pour améliorer la prise de décision en facilitant la décision collaborative. C'est ce que cette thèse a proposé, avec le développement de SOMA (Système Organique de Médiation Adaptative). Ce prototype de jumeau numérique autoapprenant a été développé autour de l'humain tant dans son fonctionnement que dans sa conception. Il vise à organiser les interactions entre les parties prenantes de manière à faire émerger une cognition collective. En orchestrant la mise en relation de leurs fonctions respectives, il ambitionne de permettre l'émergence d'une intelligence issue du système dans son ensemble.

Les travaux présentés ont permis d'apporter plusieurs contributions :

- La conception d'un espace numérique cadrant les processus décisionnels collaboratifs au sein d'organisations complexes.
- L'introduction d'indicateurs stigmergiques favorisant l'apprentissage organisationnel à partir des traces d'expériences passées.
- Le développement d'un outil d'évaluation de la cognition collective, la *Collective Cognition Scale (CCS)*.
- L'exploitation de la métaphore du cerveau comme outil conceptuel structurant la réflexion et le développement de SOMA.

Au-delà de ces apports, l'évaluation expérimentale menée dans un contexte réaliste de maintenance de moteurs d'hélicoptères grâce au prototype développé dans cette thèse montre qu'un tel système d'aide à la décision collaborative aiderait à améliorer la prise de décision collaborative, du moins dans ce contexte industriel. En particulier, les indicateurs stigmergiques aideraient à améliorer la qualité des décisions.

Cela est permis par une note au SUS de 80 en moyenne qui traduit une bonne utilisabilité. Les indicateurs stigmergiques ont apporté une nouvelle dimension dans la transmission d'information entre les utilisateurs, sans effort supplémentaire de leur part. Les modalités les plus significatives sont la couleur (rouge, vert ou gris pour un retour négatif, positif ou inconnu dans son résultat) et la proportion de résultats connus (rouges ou verts et non gris) qui vient nuancer l'influence des couleurs. La quantité totale d'indicateurs et la différence de quantité d'indicateurs entre un choix et l'autre tendent à influencer plutôt sur le temps de décision en l'augmentant et diminuant respectivement. Lors des dilemmes présentant des indicateurs générés par les réponses des utilisateurs précédents avec le premier utilisateur influencé par une erreur, une influence majeure est constatée concernant le nombre d'itérations durant lesquelles un indicateur persiste. Le nombre d'itérations sur cette expérience est faible mais les résultats sont cohérents avec les tendances qui ressortent des autres expériences même s'ils sont à considérer avec prudence. Enfin, selon la mesure de la perception subjective collective, il y a bien une amélioration ressentie de la performance de la cognition collective.

Limites et perspectives

Chaque contribution s'accompagne de limites qui ouvrent des pistes de recherche futures.

- **Espace numérique de cadrage décisionnel.**

La proposition d'un environnement numérique représentant une version simplifiée de l'environnement physique a permis de structurer les interactions collectives et de faciliter le partage d'informations. Cependant, la volonté de conserver le caractère généraliste du système a conduit à une modélisation volontairement minimaliste du point de vue des spécifications liées aux fonctions de chacun. Bien que des espaces d'expression libres ont été prévus pour palier d'éventuels oublis nécessaires aux processus collaboratifs, certaines dimensions contextuelles propres aux organisations réelles ont pu être négligées. Des perspectives consistent à enrichir progressivement cet espace avec des couches fonctionnelles spécifiques à différents métiers, tout en veillant à préserver sa généralité.

- **Indicateurs stigmergiques.**

Les expérimentations ont montré l'intérêt de tels indicateurs pour renforcer la mémoire collective et orienter les décisions. Néanmoins, les résultats sur l'effet de leur persistance doivent être interprétés avec prudence compte tenu de la taille restreinte de l'échantillon. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour tester d'autres paramétrages de persistance, explorer de nouveaux formats (au-delà de la simple codification couleur) et confirmer statistiquement les résultats obtenus. Des études à plus grande échelle permettraient également d'observer des dynamiques émergentes sur des collectifs de grande taille.

- **Outil d'évaluation de la cognition collective (CCS).**

La *Collective Cognition Scale* constitue une première proposition pour mesurer la cognition collective sur le modèle des échelles d'utilisabilité. Si les premiers résultats sont encourageants, la complexité intrinsèque de la cognition collective nécessite de poursuivre la validation de l'outil. Des travaux futurs pourraient affiner la granularité de l'échelle dans son analyse, en isolant les items des dimensions spécifiques (par exemple mémoire organisationnelle ou partage de l'attention) pour une meilleure compréhension de l'état de la cognition collective, et tester la transposabilité de l'échelle dans des contextes organisationnels variés.

- **Métaphore du cerveau.**

La comparaison entre organisation et cerveau n'est pas nouvelle dans la littérature. La contribution de cette thèse réside davantage dans son usage opératoire comme outil intellectuel pour orienter la modélisation et le développement de SOMA. Toutefois, ce choix comporte la limite d'une possible simplification excessive des réalités

organisationnelles. Des recherches ultérieures pourraient approfondir cette analogie en s'appuyant sur des avancées récentes en neurosciences, ou au contraire confronter la métaphore à d'autres modèles issus de la biologie ou des sciences sociales.

Les résultats de cette recherche confirment qu'un système tel que SOMA peut améliorer la prise de décision collective et renforcer la mémoire organisationnelle dans des environnements complexes comme la maintenance aéronautique. En intégrant des mécanismes simples mais puissants, tels que la stigmergie, ce système ouvre la voie à une meilleure intégration de l'expérience et à l'émergence progressive d'une cognition organisationnelle partagée.

L'intelligence étant une fonction émergente d'un système complexe, de très nombreux tests et mises en situations seraient nécessaires pour explorer tous les paramètres nécessaires. Mais cela étant très coûteux, les tendances de comportements réels révélés par les analyses de données expérimentales peuvent être implémentées dans des simulations numériques. Par ces simulations, des tests massifs d'un point de vue quantitatif sont possibles, afin d'explorer différentes configurations et ainsi, obtenir les émergences souhaitées.

À terme, l'extension et la généralisation de ce type de système pourraient contribuer à l'apparition de dynamiques holistiques au sein des organisations, favorisant l'intégration des fonctions disparates, ou disséminées dans le temps et l'espace, dans des processus communs d'attention, de coordination et de décision. Une telle évolution pourrait participer à l'émergence d'une conscience organisationnelle, horizon encore lointain mais porteur de nouvelles perspectives pour la résilience et l'adaptabilité des organisations complexes.

Références / Bibliographie

- Abell, M. A. (1978). La «Théorie Générale des Systèmes» de von Bertalanffy: Une contribution majeure à la pensée moderne. *Revue de Métaphysique et de Morale*, 83(3), 308–332.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111–150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Adel, A. (2022). Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. In *Journal of Cloud Computing* (Vol. 11, Number 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00314-5>
- Agnoletti, M.-F. (2016). Dynamique des groupes au travail et relations interpersonnelles. In *Psychologie du Travail et des Organisations* (pp. 158–161). Dunod.
- Akash, K., Polson, K., Reid, T., & Jain, N. (2019). Improving Human-Machine Collaboration Through Transparency-based Feedback – Part I: Human Trust and Workload Model. *IFAC-PapersOnLine*, 51(34), 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.028>
- Alves, J., Lima, T. M., & Gaspar, P. D. (2023). Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review. *Processes*, 11(1), 193. <https://doi.org/10.3390/pr11010193>
- Anderson, J. R. (1993). Problem solving and learning. *American Psychologist*, 48(1), 35.
- Ardoino, J. (1978). *Propos actuels sur l'éducation: contribution à l'éducation des adultes*. Gauthier-Villars.
- Argyris, C., & Schön, D. A. (1997). Organizational learning: A theory of action perspective. *Reis*, (77/78), 345–348.
- Aries, S., Le Blanc, B., & Ermine, J.-L. (2008). MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances. In *Hermes Science Publications-Lavoisier*.
- AS9132, S. A. E. A. S. (2002). International Aerospace Quality Group (IAQG). *Verification Standard, Feb*.
- Aung, H. N., Khambadkone, A. M., Srinivasan, D., & Logenthiran, T. (2010). Agent-based intelligent control for real-time operation of a microgrid. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 1–6.
- Autor, D. (2014). *Polanyi's paradox and the shape of employment growth*. National Bureau of Economic Research.
- Bandura, A., & Walters, R. H. (1977). *Social learning theory* (Vol. 1). Englewood cliffs Prentice Hall.
- Barnett, M. L., Boddupalli, D., Nundy, S., & Bates, D. W. (2019). Comparative accuracy of diagnosis by collective intelligence of multiple physicians vs individual physicians. *JAMA Network Open*, 2(3), e190096–e190096.

- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Hill, J., Raste, Y., & Plumb, I. (2001). The ' ' Reading the Mind in the Eyes ' ' Test Revised Version : A Study with Normal Adults, and Adults with Asperger Syndrome or High-functioning Autism. In *J. Child Psychol. Psychiat* (Vol. 42, Number 2).
- Bassanetti, T., Cezera, S., Delacroix, M., Escobedo, R., Blanchet, A., Sire, C., & Theraulaz, G. (2023). *Cooperation and deception through stigmergic interactions in human groups*. <https://doi.org/10.1101/2023.04.20.537511>
- Baudrillard, J. (1981). *Simulacres and simulation*. Collection Débats. Paris: Galilée.
- Beach, L. R. (1993). Broadening the definition of decision making: The role of prechoice screening of options. *Psychological Science*, 4(4), 215–220.
- Beck, K. (2000). *Extreme programming explained: embrace change*. Addison-Wesley.
- Beer, S. (1995). *Brain of the Firm*. John Wiley & Sons.
- Bevan, N. (2009). International Standards for Usability Should Be More Widely Used. In *Journal of Usability Studies* (Vol. 4).
- Bodart, Y. (2018). Les phénomènes de groupe. *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, 117118(1), 119–146.
- Bonabeau, E. (1999). Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems. *Oxford University Press Google Schola*, 2, 25–34.
- Bourdieu, P. (1984). *La Distinction: critique sociale du jugement* (Paris: Éditions de Minuit, 1979). See Also *His Raisons Pratiques: Sur La Théorie de l'Action*.
- Boy, G. A. (2003). L'Ingénierie Cognitive: Interaction Homme-Machine et Cognition (The French Handbook of Cognitive Engineering). *Traité de Sciences Cognitives, Hermes Sciences, Lavoisier, Paris*.
- BOY, G. A. (2019). FlexTech: From Rigid to Flexible Human–Systems Integration.No Title. *Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution*, 465–481.
- Boy, G. A., & Schmitt, K. A. (2013). Design for safety: A cognitive engineering approach to the control and management of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, 52, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.08.027>
- Boyd, J. R. (2018). *A discourse on winning and losing* (Vol. 400). Air University Press Maxwell Air Force Base, AL.
- Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., & Dorigo, M. (2013). Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*, 7, 1–41.
- Bratko, I. (2001). *Prolog programming for artificial intelligence*. Pearson education.
- Braudel, F. (2018). *La dynamique du capitalisme*. Flammarion.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 189(194), 4–7.
- Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *1989*, 18(1), 32–42.

- Bruner, J. S. (1961). The act of discovery. *Harvard Educational Review*.
- Burns, T., & Stalker, G. M. (1961). Mechanistic and organic systems. *Classics of Organizational Theory*, 10(2), 209–214.
- Buzsaki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford university press.
- Camara Dit Pinto, S., Villeneuve, É., Masson, D., Boy, G. A., & Urfels, L. (2024). Reality anchor methodology: how to design a digital twin to support situation awareness. *Journal of Engineering Design*, 35(6), 775–799.
- Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraula, G., & Bonabeau, E. (2020). Self-organization in biological systems. In *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton university press.
- Cambridge University Press. (2025). *decision-making — Cambridge Dictionary*. <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/decision-making>
- Cannon-Bowers, J. A., Salas, E., & Converse, S. (1993). Shared mental models in expert team decision making. *Individual and Group Decision Making: Current Issues*, 221, 221–246.
- Carvalho, D. V., Pereira, E. M., & Cardoso, J. S. (2019). Machine learning interpretability: A survey on methods and metrics. *Electronics*, 8(8), 832.
- Checkland, P. (1981). *Systems thinking, systems practice*.
- Chester, B. (1938). The functions of the executive. *Harvard University Presse, Cambridge*.
- Chomsky, N. (1995). *The Minimalist Program*. MIT Press.
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113, 103130.
- Ciucu-Durnoi, A. N., Delcea, C., Stănescu, A., Teodorescu, C. A., & Vargas, V. M. (2024). Beyond Industry 4.0: Tracing the Path to Industry 5.0 through Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 16(12), 5251.
- Clancey, W. J. (1997). *Situated cognition: On human knowledge and computer representations*. Cambridge university press.
- Clark, A., & Chalmers, D. J. (1998). The Extended Mind. In *The Extended Mind* (Vol. 58). Oxford University Press.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2013). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. Routledge.
- Cortés-Leal, A., Cárdenas, C., & Del-Valle-Soto, C. (2022). Maintenance 5.0: Towards a Worker-in-the-Loop Framework for Resilient Smart Manufacturing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/app122211330>
- Couzin, I. D., Krause, J., Franks, N. R., & Levin, S. A. (2005). Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*, 433(7025), 513–516.
- Craft, J. L. (2013). A review of the empirical ethical decision-making literature: 2004–2011. *Journal of Business Ethics*, 117(2), 221–259.

- Crnobrnja, J., Stefanovic, D., Romero, D., Softic, S., & Marjanovic, U. (2023). Digital transformation towards industry 5.0: A Systematic literature review. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 269–281.
- de Zarzà, I., de Curtò, J., Roig, G., Manzoni, P., & Calafate, C. T. (2023). Emergent Cooperation and Strategy Adaptation in Multi-Agent Systems: An Extended Coevolutionary Theory with LLMs. *Electronics (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/electronics12122722>
- Decety, J. (2020). Le pouvoir de l’amitié et des relations interpersonnelles. L’éclairage des neurosciences sociales. *Revue de Neuropsychologie*, 12(2), 122–127. <https://doi.org/10.1684/nrp.2020.0546>
- Dehaene, S., & Changeux, J.-P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200–227.
- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 229–240.
- Deming, W. E. (1986). Principles for transformation. *Out of the Crisis*, 18, 96.
- Deneubourg, J.-L., Aron, S., Goss, S., & Pasteels, J. M. (1990). The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3, 159–168.
- Devlin, J. (2018). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *ArXiv Preprint ArXiv:1810.04805*.
- DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147–160.
- Dixon, N. M. (1999). *The organizational learning cycle: How we can learn collectively*. Gower Publishing, Ltd.
- Dodrill, C. B. (1983). Long-term reliability of the Wonderlic Personnel Test. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 51(2), 316.
- Donaldson, L. (2001). *The contingency theory of organizations*. Sage.
- Downes, S. (2005). *An introduction to connective knowledge*.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Vol. 326). John Wiley & Sons.
- Drucker, P. F. (1992). Organizations. *Harvard Business Review*, 20(7), 281–293.
- Dumez, H. (2014). La compréhension de l’entreprise entre description, théorie et norme. In *L’entreprise* (pp. 135–152). Éditions Sciences Humaines.
- Easterby-Smith, M. P. V., & Araujo, L. M. (1999). *Organizational learning: current debates and opportunities*. Sage.
- EESC. (2018). *Industry 5.0*. <https://www.eesc.europa.eu/en/agenda/ouevents/events/industry-50>.
- Elias, N., Etoré, J., & Chartier, R. (1991). *La société des individus*. Fayard.

- Elliott, M. (2006). Stigmergic collaboration: the evolution of group work: introduction. *M/c Journal*, 9(2).
- Elwyn, G., Frosch, D., Thomson, R., Joseph-Williams, N., Lloyd, A., Kinnersley, P., Cording, E., Tomson, D., Dodd, C., & Rollnick, S. (2012). Shared decision making: a model for clinical practice. *Journal of General Internal Medicine*, 27(10), 1361–1367.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37, 85–104.
- Endsley, M. R. (2017). From here to autonomy: lessons learned from human–automation research. *Human Factors*, 59(1), 5–27.
- Endsley, M. R., & Garland, D. J. (2000). *Situation awareness analysis and measurement*. CRC Press.
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316.
- Faucheux, C. (1957). La dynamique de groupe. *L'année Psychologique*, 57(2), 425–440.
- Fayol, H. (1918). *Administration industrielle et générale: prévoyance, organisation, commandement, coordination, contrôle*. H. Dunod et e. Pinat.
- Ferber, J. (1997). *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.
- Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity*. Cambridge university press.
- Fisher, R. A. (1934). *Statistical methods for research workers*.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). “Mini-mental state”: a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12(3), 189–198.
- Forrester, J. W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48(10), 1037–1041.
- Friedberg, E. (1977). *L'acteur et le système: Les contraintes de l'action collective*. Éditions du Seuil.
- Friedberg, E. (2011). Rationalité et analyse des organisations. *Idées Économiques et Sociales*, N° 165(3), 15–23. <https://doi.org/10.3917/idee.165.0015>
- Gaba, D. M., Howard, S. K., & Small, S. D. (1995). Situation awareness in anesthesiology. *Human Factors*, 37(1), 20–31.
- Galatolo, F. A., Cimino, M. G. C. A., & Vaglini, G. (2019). Using stigmergy as a computational memory in the design of recurrent neural networks. *ArXiv Preprint ArXiv:1903.01341*.
- Galbraith, J. R. (1973). *Designing complex organizations, 1973*. Reading, Mass: Adison-Wesley Publishing Company.
- Galbraith, J. R. (2002). *Designing organizations: an executive guide to strategy*. Structure, 197.

- Garvin, D. A. (1993). "Building a learning organization," *Harvard Business Review*, 71: 4, 78-91.
- Garvin, D. A., Edmondson, A. C., & Gino, F. (2008). Is yours a learning organization? *Harvard Business Review*, 86(3), 109.
- Gélizé, M. (2020). *Pour la performance de projet : Un apprentissage de la pensée complexe au service de l'accompagnement. Cas d'un pôle d'établissements de santé.* <https://theses.hal.science/tel-03093714>
- Geschwind, N. (1970). The Organization of Language and the Brain: Language disorders after brain damage help in elucidating the neural basis of verbal behavior. *Science*, 170(3961), 940–944.
- Giddens, A. (1984). The constitution of society: Outline of the theory of structuration. *Polity*.
- Gittell, J. H. (2002). Coordinating mechanisms in care provider groups: Relational coordination as a mediator and input uncertainty as a moderator of performance effects. *Management Science*, 48(11), 1408–1426. <https://doi.org/10.1287/mnsc.48.11.1408.268>
- Glaser, B., & Strauss, A. (2017). *Discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research.* Routledge.
- Gollwitzer, P. M. (1999). Implementation intentions: strong effects of simple plans. *American Psychologist*, 54(7), 493.
- Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, J. (2008). System-of-systems engineering management: A review of modern history and a path forward. *IEEE Systems Journal*, 2(4), 484–499.
- Grassé, P. P. (1959). La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6(1), 41–80. <https://doi.org/10.1007/BF02223791>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems Organization, Operation, and Information Systems View project DFAM-Design for Additive Manufacturing and Additive Manufacturing evaluation View project Digital Twin: . *Springer*, 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Gronier, G., & Baudet, A. (2021). Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(16), 1571–1582. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828>
- Harkins, S. G. (1987). Social loafing and social facilitation. *Journal of Experimental Social Psychology*, 23(1), 1–18.
- Harkins, S. G., & Jackson, J. M. (1985). The role of evaluation in eliminating social loafing. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 11(4), 457–465.

- Hart, S. G. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Human Mental Workload/Elsevier*.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. *Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung*, 187–196.
- Hatchuel, A., & Weil, B. (1992). *L'expert et le système: gestion des savoirs et métamorphose des acteurs dans l'entreprise industrielle; suivi de Quatre histoires de systèmes-experts*. Economica Paris.
- Hebb, D. O. (2005). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. Psychology press.
- Herreros, G. (2012). Vers des organisations réflexives: pour un autre management. *Nouvelle Revue de Psychosociologie*, 13(1), 43–58.
- Heylighen, F. (2016). Stigmergy as a universal coordination mechanism I: Definition and components. *Cognitive Systems Research*, 38, 4–13.
- Hochreiter, S. (1997). Long Short-term Memory. *Neural Computation MIT-Press*.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- Hörmann, H.-J. (1994). *FOR-DEC-A prescriptive model for aeronautical decision making*.
- Hu, Y., Wu, L., Li, N., & Zhao, T. (2024). Multi-Agent Decision-Making in Construction Engineering and Management: A Systematic Review. *Sustainability*, 16(16), 7132. <https://doi.org/10.3390/su16167132>
- Huang, N., Du, Q., Bai, L., & Chen, Q. (2023). Optimizing collaborative decision-making of multi-agent resources for large-scale projects: from a matching perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2022-1008>
- Huguet, P., Galvaing, M. P., Monteil, J. M., & Dumas, F. (1999). Social presence effects in the Stroop task: further evidence for an attentional view of social facilitation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 77(5), 1011.
- Hunt, E. R., Jones, S., & Hauert, S. (2019). Testing the limits of pheromone stigmergy in high-density robot swarms. *Royal Society Open Science*, 6(11), 190225.
- Hutchins, E. (1995a). *Cognition in the Wild*. MIT press.
- Hutchins, E. (1995b). How a cockpit remembers its speeds. *Cognitive Science*, 19(3), 265–288.
- ISO, I. S. O. (2014). 55000: Asset Management-Overview, Principles and Terminology. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- Jensen, A., Secchi, D., & Jensen, T. W. (2022). A distributed framework for the study of organizational cognition in meetings. *Frontiers in Psychology*, 13, 769007.

- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S., Hudspeth, A. J., & Mack, S. (2000). *Principles of neural science* (Vol. 4). McGraw-hill New York.
- Katz, D., & Kahn, R. (2015). The social psychology of organizations. In *Organizational behavior 2* (pp. 152–168). Routledge.
- Kerr, N. L. (1983). Motivation losses in small groups: A social dilemma analysis. *Journal of Personality and Social Psychology*, *45*(4), 819.
- Kerr, N. L., & Bruun, S. E. (1981). Ringelmann revisited: Alternative explanations for the social loafing effect. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *7*(2), 224–231.
- Khamphanchai, W., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2012). A multi-agent system for restoration of an electric power distribution network with local generation. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–8.
- Kim, D. H. (1993). The Link between Individual and Organizational Learning. *Management Review*, 37–50.
- Kim, D. H. (2009). and Organizational Learning. *The Strategic Management of Intellectual Capital*, 41.
- Klein, G. A. (1993). A recognition-primed decision (RPD) model of rapid decision making. *Decision Making in Action: Models and Methods*, *5*(4), 138–147.
- Köhler, O. (1927). On group efficiency of physical labor and the conditions of optimal collective performance. *Industrielle Psychotechnik*, *4*, 209–226.
- Kolb, D. A. (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *25*.
- Lake, B. M., Salakhutdinov, R., & Tenenbaum, J. B. (2015). Human-level concept learning through probabilistic program induction. *Science*, *350*(6266), 1332–1338.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2008). *Metaphors we live by*. University of Chicago press.
- Lakoff, G., Johnson, M., Defornel, M., & Lecerle, J.-J. (1985). Les métaphores dans la vie quotidienne. (*No Title*).
- LAPAN, M. (2018). Deep Reinforcement Learning Hands-On: Apply modern RL methods, with deep Q-networks, value iteration, policy gradients, TRPO, AlphaGo Zero and more. *Packt Publishing Ltd*.
- Laugwitz, B., Held, T., & Schrepp, M. (2008). Construction and evaluation of a user experience questionnaire. *HCI and Usability for Education and Work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian*

- Computer Society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20-21, 2008. Proceedings 4, 63–76.*
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press.
- Lawrence, P. R., & Lorsch, J. W. (1967). Organization and environment: Managing differentiation and integration. *(No Title)*.
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Bordas.
- Le Moigne, J.-L. (1994). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. FeniXX.
- Leng, J., Zhang, H., Yan, D., Liu, Q., Chen, X., & Zhang, D. (2019). Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10*, 1155–1166.
- Lewicki, R. J., & Bunker, B. B. (2012). Developing and Maintaining Trust in Work Relationships. In *Trust in Organizations: Frontiers of Theory and Research* (pp. 114–139). SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781452243610.n7>
- Lewis, J. R. (1995). IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use. *International Journal of Human-Computer Interaction, 7*(1), 57–78.
- Lewis, K. (2003). Measuring transactive memory systems in the field: scale development and validation. *Journal of Applied Psychology, 88*(4), 587.
- Lieberman, M. D., Eisenberger, N. I., Crockett, M. J., Tom, S. M., Pfeifer, J. H., & Way, B. M. (2007). *Putting Feelings Into Words Affect Labeling Disrupts Amygdala Activity in Response to Affective Stimuli*.
- Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., Silver, D., & Wierstra, D. (2015). Continuous control with deep reinforcement learning. *ArXiv Preprint ArXiv:1509.02971*.
- Liu, C., & Xu, X. (2017). Cyber-physical machine tool—the era of machine tool 4.0. *Procedia Cirp, 63*, 70–75.
- Mack, M. (1997). *Co-évolution, dynamique créatrice: libérer les richesses de l'intelligence partagée*. FeniXX.
- Maguire, M. (2013). LNCS 8009 - Using Human Factors Standards to Support User Experience and Agile Design. In *LNCS* (Vol. 8009).
- Marcus, G. (2018). Deep learning: A critical appraisal. *ArXiv Preprint ArXiv:1801.00631*.
- Matta, N., Ermine, J. L., Aubertin, G., & Trivin, J.-Y. (2002). Knowledge Capitalization with a knowledge engineering approach: the MASK method. *Knowledge Management and Organizational Memories, 17–28*.
- Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1991). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.

- Mayer, R. E., Bove, W., Bryman, A., Mars, R., & Tapangco, L. (1996). When less is more: Meaningful learning from visual and verbal summaries of science textbook lessons. *Journal of Educational Psychology, 88*(1), 64.
- Maynard, A. D. (2015). Navigating the fourth industrial revolution. *Nature Nanotechnology, 10*(12), 1005–1006.
- Mehrabian, A. (1981). *Silent Messages: Implicit Communication of Emotions and Attitudes*. Wadsworth Publishing Company. <https://books.google.fr/books?id=WJgoAAAAYAAJ>
- Merlo, C. (2003). Modélisation des connaissances en conduite de l'ingénierie : mise en oeuvre d'un environnement d'assistance aux acteurs. *Université Bordeaux 1, 41*(234). <http://www.theses.fr/2010BOR13997>
- Merlo, C., & Girard, P. (2004). Information system modelling for engineering design coordination. *Computers in Industry, 55*(3), 317–334.
- Meyer, J. W., & Rowan, B. (1977). Institutionalized organizations: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology, 83*(2), 340–363.
- Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution: a historical perspective. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(3), 141–144.
- Miller, N. S., & Brewer, M. B. (2013). *Groups in contact: The psychology of desegregation*. Academic Press.
- Minsky, M. (1986). *The Society of Mind*. New York : Simon and Schuster. ISBN : 978-0-671-60740-1.
- Mintzberg, H. (1979). *The structure of organizations: A synthesis of the research*. Prentice-Hall.
- Mintzberg, H. (1993). *Structure in fives: Designing effective organizations*. Prentice-Hall, Inc.
- Mintzberg, H., Raisinghani, D., & Theoret, A. (1976). The structure of "unstructured" decision processes. *Administrative Science Quarterly, 24*–275.
- Miton, H., & DeDeo, S. (2022). The cultural transmission of tacit knowledge. *Journal of the Royal Society Interface, 19*(195), 20220238.
- Morgan, G. (1999). *Images de l'organisation*. Presses Université Laval.
- Morin, E. (2013). *La méthode: la nature de la nature*. Média Diffusion.
- Moscovici, S., Doise, W., & Dissensions, C. (1992). une théorie générale des décisions collectives. *Collection: Psychologie Sociale, PUF, Paris*.
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society, 53*(4), 695–699.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing, 11*, 939–948.

- NIELSEN, J. (1993). Usability Heuristics. *Usability Engineering*, 115–163. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-052029-2.50008-5>
- Nielsen, J., & Landauer, T. K. (1993). Mathematical model of the finding of usability problems. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/169059.169166>
- North, D. C. (1990). Institutions, institutional change and economic performance. *Cambridge University*.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford university press.
- Oliveira, P., Gomes, L., Pinto, T., Faria, P., Vale, Z., & Morais, H. (2013). Load control timescales simulation in a multi-agent smart grid platform. *IEEE PES ISGT Europe 2013*, 1–5.
- Oliveira, P., Pinto, T., Praça, I., Vale, Z., & Morais, H. (2013). Intelligent micro grid management using a multi-agent approach. *2013 IEEE Grenoble Conference*, 1–6.
- Osborne, J. (2010). Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 15(1).
- Page, S. (2010). Diversity and complexity. In *Diversity and complexity*. Princeton University Press.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297.
- Parnell, R. A., & Gangwish, A. (2023). Effective Collaborative Decision-Making Includes Stakeholder Analysis and Communication. In *A Practical Guide for Developing Cross-Disciplinary Collaboration Skills* (pp. 103–123). Springer.
- Patrashkova-Volzdoska, R. R., McComb, S. A., Green, S. G., & Compton, W. D. (2003). Examining a curvilinear relationship between communication frequency and team performance in cross-functional project teams. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 50(3), 262–269. <https://doi.org/10.1109/TEM.2003.817298>
- Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G., & Costantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*, 102, 79–100.
- Pedler, M., Burgoyne, J., & Boydell, T. (1991). *The Learning Company: a Strategy for Sustainable Development*.
- Pfeffer, J., & Salancik, G. R. (2003). *The external control of organizations: A resource dependence perspective*. Stanford University Press.
- Piaget, J. (1970). *Genetic epistemology*. Columbia University Press.
- Piaget, J. (2005). *The psychology of intelligence*. Routledge.
- Picard, D., & Marc, E. (2015). Chapitre VI. Travail et organisations. *Que Sais-Je?*, 2, 97–116.
- Poincaré, H. (1910). Mathematical creation. *The Monist*, 20(3), 321–335.

- Popper, S. W., Bankes, S. C., Callaway, R., & DeLaurentis, D. (2004). System of systems symposium: Report on a summer conversation. *Potomac Institute for Policy Studies, Arlington, VA, 320*.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2000). Developing mechanisms of self-regulation. *Development and Psychopathology, 12*(3), 427–441.
- Pylyshyn, Z. W. (1986). Cognitive science and the study of cognition and language. *Pattern Recognition by Humans and Machines Speech Perception, 1*, 295–313.
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access, 6*, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Rabardel, P., & Beguin, P. (2005). Instrument mediated activity: From subject development to anthropocentric design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science, 6*(5), 429–461. <https://doi.org/10.1080/14639220500078179>
- Rada, M. (2018). *Industry 5.0 Definition*. <https://Michael-Rada.Medium.Com/Industry-5-0-Definition-6a2f9922dc48>.
- Randahl, D. (2024). *This is not normal! (re-) evaluating the lower n guidelines for regression analysis*.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, (3)*, 257–266.
- Rauffet, P. (2009). *A methodology for the application of an automated and interactive reification process in a virtual Community of Practice*. <https://theses.hal.science/tel-00395670>
- Reitan, R. M. (1958). Validity of the Trail Making Test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and Motor Skills, 8*(3), 271–276.
- Riedl, C., Kim, Y. J., Gupta, P., Malone, T. W., & Woolley, A. W. (2021). Quantifying collective intelligence in human groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 118*(21). <https://doi.org/10.1073/pnas.2005737118>
- Roethlisberger, F. J., & Dickson, W. J. (2003). *Management and the Worker* (Vol. 5). Psychology press.
- Rosenthal, D. M. (2005). *Consciousness and mind: Oxford University Press*.
- Roumy, M. (2022). *Modélisation et pilotage des capacités d'Innovation organisationnelle pour favoriser la capacité d'Innovation de la grande entreprise, cas d'étude : SNCF Réseau*. <https://theses.hal.science/tel-03865850v1>
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature, 323*(6088), 533–536.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson.

- Rzevski, G., Skobelev, P., & Zhilyaev, A. (2022). Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management. *Mathematics*, *10*(11), 1923.
- Salas, E., Cooke, N. J., & Rosen, M. A. (2008). On teams, teamwork, and team performance: Discoveries and developments. *Human Factors*, *50*(3), 540–547.
- Salvado, L. L., Villeneuve, E., Masson, D., Abi Akle, A., & Bur, N. (2022). Decision Support System for technology selection based on multi-criteria ranking: Application to NZEB refurbishment. *Building and Environment*, *212*, 108786.
- Scapin, D. L., & Bastien, J. M. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour and Information Technology*, *16*(4–5), 220–231. <https://doi.org/10.1080/014492997119806>
- Schein, E. H. (2010). *Organizational culture and leadership* (Vol. 2). John Wiley & Sons.
- Schneider, B., Ehrhart, M. G., & Macey, W. H. (2013). Organizational climate and culture. *Annual Review of Psychology*, *64*(1), 361–388.
- Scott, W. R. (2008). *Institutions and organizations: Ideas and interests*. Sage Publications.
- Scott, W. R., & Davis, G. F. (2015). *Organizations and organizing: Rational, natural and open systems perspectives*. Routledge.
- Seguy, A., Noyes, D., & Clermont, P. (2010). Characterisation of collaborative decision making processes. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *23*(11), 23. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.506654>
- Senge, P. (1990). Peter Senge and the learning organization. *Dimension*, *14*.
- Senge, P. M. (1990). *The art and practice of the learning organization*. New York: Doubleday.
- Senge, P. M. (2006). *The fifth discipline: The art and practice of the learning organization*. Broadway Business.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, *52*(3–4), 591–611.
- Shea, N., Boldt, A., Bang, D., Yeung, N., Heyes, C., & Frith, C. D. (2014). Supra-personal cognitive control and metacognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(4), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.01.006>
- Sheikhalishahi, M., Pintelon, L., & Azadeh, A. (2016). Human factors in maintenance: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *22*(3), 218–237.
- Shulman, K. I. (2000). Clock-drawing: is it the ideal cognitive screening test? *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *15*(6), 548–561.
- Siemens, G. (2005). Connectivism: Learning as network-creation. *ASTD Learning News*, *10*(1), 1–28.
- Simon, H. (1957). A behavioral model of rational choice. *Models of Man, Social and Rational: Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*, *6*(1), 241–260.

- Simon, H. A. (1960). *The new science of management decision*.
- Simon, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 467–482.
- Simon, H. A. (1990). Bounded rationality. *Utility and Probability*, 15–18.
- Skinner, B. F. (1957). *Verbal behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Spencer, D. (2009). *Card sorting: Designing usable categories*. Rosenfeld Media.
- Sporns, O., Tononi, G., & Kötter, R. (2005). The human connectome: a structural description of the human brain. *PLoS Computational Biology*, 1(4), e42.
- Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker–listener neural coupling underlies successful communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(32), 14425–14430.
- Sutton, R. S. (2018). Reinforcement learning: An introduction. *A Bradford Book*.
- Sutton, R. S., McAllester, D., Singh, S., & Mansour, Y. (1999). Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). Using multivariate statistics, 6th edn Boston. *Ma: Pearson*.
- Tajfel, H., & Turner, J. C. (2004). The social identity theory of intergroup behavior. In *Political psychology* (pp. 276–293). Psychology Press.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
- Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., & Qi, Q. (2017). Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(1), 1–9.
- Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. NuVision Publications, LLC.
- Theraulaz, G., & Bonabeau, E. (1999). A brief history of stigmergy. *Artificial Life*, 5(2), 97–116.
- Thompson, J. D. (2003). *Organizations in action: Social science bases of administrative theory*. Transaction publishers.
- Thompson, J. D. (2017). *Organizations in action: Social science bases of administrative theory*. Routledge.
- Touraine, A. (2018). *La production de la société*. Média Diffusion.

- Trist, E. L., & Bamforth, K. W. (1951). Some social and psychological consequences of the longwall method of coal-getting: An examination of the psychological situation and defences of a work group in relation to the social structure and technological content of the work system. *Human Relations*, 4(1), 3–38.
- Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.
- Tushman, M. L., & Nadler, D. A. (1978). Information processing as an integrating concept in organizational design. *Academy of Management Review*, 3(3), 613–624.
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). *Industry 4.0: managing the digital transformation*. Springer.
- Vannereau, J., & Lemaître, D. (2020). La problématisation dans l'apprentissage du management en filière d'ingénieur. *Revue Internationale de Pédagogie de l'enseignement Supérieur*, 36(36 (1)).
- Varela, F. G., Maturana, H. R., & Uribe, R. (1974). Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model. *BioSystems*, 5(4), 187–196. [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(74\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0303-2647(74)90031-8)
- Varela, F. J., Thomson, E., & Rosch, E. (1993). L'inscription corporelle de l'esprit: sciences cognitives et expérience humaine. (*No Title*).
- VASILJEVIC, Dimitri et OBERLÉ, Dominique. (2016). *Conduites et émotions dans les groupes*. Presses Universitaires de Grenoble.
- Vignaux, G. (1991). *Les sciences cognitives: une introduction*. FeniXX.
- Villeneuve, E., Merlo, C., Terrasson, G., Abi Akle, A., Masson, D. H., & Llarra, A. (2019). Décision dans les systèmes cyber-physiques et humains: application à l'élevage de précision. *CIGI QUALITA 2019-13th International Conference CIGI QUALITA*, (Papier n° 7 (9 p.)).
- Voigt, P., & Von dem Bussche, A. (2017). The eu general data protection regulation (gdpr). *A Practical Guide, 1st Ed., Cham: Springer International Publishing*, 10(3152676), 10–5555.
- Volz, L. J., & Gazzaniga, M. S. (2017). Interaction in isolation: 50 years of insights from split-brain research. *Brain*, 140(7), 2051–2060. <https://doi.org/10.1093/brain/awx139>
- Vygotsky, L. S., & Cole, M. (1978). *Mind in society: Development of higher psychological processes*. Harvard university press.
- Watkins, C. J. C. H., & Dayan, P. (1992). Q-learning. *Machine Learning*, 8, 279–292.
- Watkins, K. E., & Marsick, V. J. (1993). *Sculpting the learning organization: Lessons in the art and science of systemic change*. ERIC.
- Weber, M. (1978). Economy and society: An outline of interpretive sociology. *University of California*.
- Weber, R., Aha, D. W., & Becerra-Fernandez, I. (2001). Intelligent lessons learned systems. *Expert Systems with Applications*, 20(1), 17–34.

- Wechsler, D. (1997). Manual for the Wechsler adult intelligence scale. *(No Title)*.
- Wegner, D. M. (1987). Transactive memory: A contemporary analysis of the group mind. *Theories of Group Behavior/Springer-Verlag*.
- Weick, K. E., & Weick, K. E. (1995). *Sensemaking in organizations* (Vol. 3). Sage publications
Thousand Oaks, CA.
- Weimerskirch, H., Martin, J., Clerquin, Y., Alexandre, P., & Jiraskova, S. (2001). Energy saving in flight formation. *Nature*, *413*(6857), 697–698.
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT press.
- Winograd, T. (1986). *Understanding computers and cognition: A new foundation for design*. Intellect Books.
- Wood, W., & Runger, D. (2016). Psychology of habit. *Annual Review of Psychology*, *67*(1), 289–314.
- Woodward, J. (1965). *Industrial organization: Theory and practice. (No Title)*.
- Woolley, A. W., Chabris, C. F., Pentland, A., Hashmi, N., & Malone, T. W. (2010). Evidence for a collective intelligence factor in the performance of human groups. *Science*, *330*(6004), 686–688.
- Worchel, S., Rothgerber, H., Day, E. A., Hart, D., & Butemeyer, J. (1998). Social identity and individual productivity within groups. *British Journal of Social Psychology*, *37*(4), 389–413.
- Xu, X., Li, R., Zhao, Z., & Zhang, H. (2021). Stigmergic independent reinforcement learning for multiagent collaboration. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *33*(9), 4285–4299.
- Xu, X., Zhao, Z., Li, R., & Zhang, H. (2019). Brain-inspired stigmergy learning. *IEEE Access*, *7*, 54410–54424.
- Yadav, S. P. (2007). The wholeness in suffix-omics,-omes, and the word om. *Journal of Biomolecular Techniques: JBT*, *18*(5), 277.
- Zaccarella, E., & Friederici, A. D. (2015). Merge in the human brain: A sub-region based functional investigation in the left pars opercularis. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1818.
- Zimmerman, B. J. (1989). Models of self-regulated learning and academic achievement. In *Self-regulated learning and academic achievement: Theory, research, and practice* (pp. 1–25). Springer.

Annexes

Annexe A : Les sciences cognitives derrière la modélisation

L'organisation, au même titre que le cerveau, peut être considérée comme un système multi-agents, et que ce modèle de système multi-agents permet d'appréhender une grande complexité et processus multi-niveau. Ces travaux confirment l'intérêt de ce modèle en soulignant que les processus décisionnels collectifs dans un contexte de maintenance sont complexes et multi-niveaux à bien des égards lorsqu'on les étudie à travers les modèles existants.

Dans ces conditions, les sciences cognitives peuvent être d'un grand secours, puisque l'objectif est de rendre l'organisation autoapprenante et que, pour ce faire, l'analogie avec le cerveau a été adoptée. Concernant le modèle nécessaire, les sciences cognitives apportent autant de clarifications que de disciplines qu'elles comportent, à savoir six : la philosophie, les neurosciences, la linguistique, la psychologie, l'intelligence artificielle et l'anthropologie (G. A. Miller, 2003).

Chacune de ces disciplines permet d'affiner l'approche et la conception du modèle en sélectionnant les concepts et sous-concepts pertinents.

La philosophie

La philosophie permet de commencer par soulever les questions sous-jacentes et fondatrices du projet de recherche, et *in fine*, l'ingénierie débouchant sur un prototype. En effet, lorsque le concept de SMA représentant l'organisation est évoqué, le préjugé d'une simulation nettement séparée de la réalité pour la représenter peut limiter les perspectives. Mais pour répondre aux problématiques contemporaines, la simulation précède désormais la réalité et en vient à la produire (Baudrillard, 1981). Les modèles engendrent une réalité qui leur est subordonnée. Les symboles ne se contentent pas de mimer la réalité mais en deviennent partie intégrante, voire la remplacent. Dans cette étude, le SMA a pour vocation de s'intégrer dans l'organisation existante et de se confondre avec elle. Il doit donc représenter une augmentation de la réalité plutôt qu'une reproduction parallèle. Ainsi, cette augmentation a pour objectif d'apporter les conditions nécessaires à l'émergence d'une organisation autoapprenante, notamment par l'apport d'une métacognition supra personnelle présentée dans le chapitre précédent.

En biologie, cette remise en question des visions dichotomiques traditionnelles a donné lieu au concept d'autopoïèse qui précise la définition et la compréhension du vivant (F. G. Varela et al., 1974). L'autopoïèse est la capacité d'un système vivant à se générer lui-même et se maintenir en vie, c'est-à-dire maintenir son organisation interne (clôture organisationnelle). Cependant, ce système autopoïétique interagit avec son environnement à travers des interactions structurelles. Il est influencé par son environnement et influence également son environnement. Il y a un couplage structurel. Le système vivant est donc autonome dans sa définition interne, tout en restant dépendant des conditions environnementales pour persister. Un véritable processus de cocréation peut ainsi être évoqué entre le système et son environnement. Ceci est particulièrement visible dans les systèmes écologiques ou planétaires : par exemple, l'atmosphère terrestre et la biosphère sont en interaction dynamique. Les organismes vivants ont généré, par leurs activités (photosynthèse,

respiration, etc.), les composants chimiques de l'atmosphère (oxygène, dioxyde de carbone). Inversement, cette atmosphère permet aux organismes vivants de survivre. Autrement dit, l'atmosphère et la biosphère n'existeraient pas l'une sans l'autre. Aucune des deux n'a précédé l'autre, elles se sont cocréées.

L'application de ce concept d'autopoïèse à la philosophie des sciences cognitives l'élargit en donnant naissance au concept d'énaction (F. J. Varela et al., 1993). L'énaction souligne l'idée que la cognition émerge d'une interaction dynamique entre un organisme et son environnement. À nouveau, il y a un couplage entre l'organisme et son environnement. L'organisme « énaque » son environnement en agissant sur lui et en le percevant selon ses propres structures internes. Simultanément, l'environnement contribue à façonner les possibilités d'action et de perception de l'organisme. La cognition est donc un processus physique incarné et situé, non pas seulement dans le cerveau, mais dans l'ensemble du corps et de ses interactions. La cognition émerge donc de la relation dynamique avec l'environnement, autrement dit, de l'expérience vécue. Il y a une cocréation entre la cognition et la niche cognitive, ou environnement cognitif.

L'écriture est un exemple remarquable de cette cocréation. Son invention a transformé la pensée humaine en externalisant la mémoire et en la structurant. Cela a permis le développement du raisonnement abstrait. En retour, cette évolution cognitive a fait émerger un nouvel environnement dans lequel a été mené le développement de nouveaux supports (livres, écrans), modifiant encore la manière dont nous lisons, apprenons et organisons l'information. De même, les cartes ont permis d'externaliser la représentation de l'espace. La sollicitation de la mémoire spatiale diminue et la délégation à un système augmente au fur et à mesure des évolutions comme l'apparition du GPS.

Apport de l'approche philosophique au modèle

Ce domaine de la philosophie permet de clarifier le fait que le prototype de SMA peut former en lui-même une structure de communication et engendrer une nouvelle réalité qui fonctionne sur ses propres règles et références plutôt que s'ajouter en parallèle de la réalité existante, comme représenté sur la Figure A.1. Le système crée une nouvelle réalité qui remplace l'ancienne en formant un nouveau cadre d'échanges qui préformate les interactions. Cette fin d'une vision dichotomique au profit d'une vision d'intégration et de cocréation dans la philosophie générale de Baudrillard (Baudrillard, 1981) est clarifiée dans le

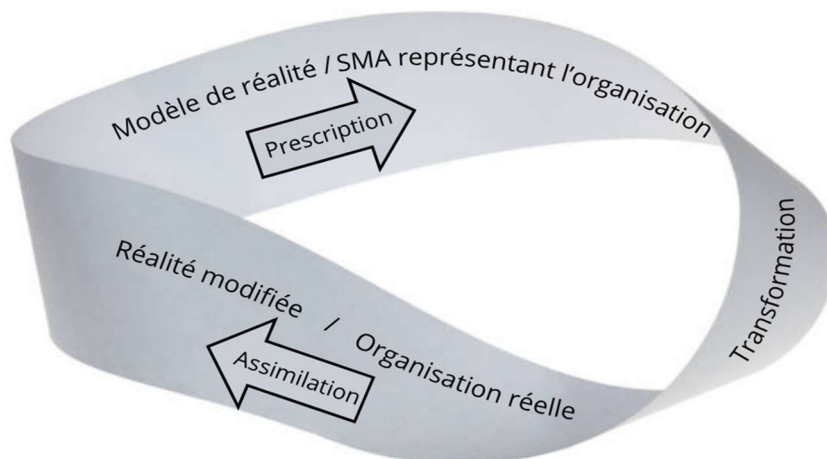


Figure A.1 : Cocréation entre le SMA et l'organisation

contexte des sciences par Maturana (Maturana & Varela, 1991) et plus précisément dans la philosophie des sciences cognitives par Varela (F. J. Varela et al., 1993). Bien que cette discipline puisse sembler abstraite et éloignée des recherches appliquées, elle établit des fondations épistémologiques solides, essentielles pour aborder le modèle à travers les autres disciplines des sciences cognitives. Pour approfondir les connaissances concrètes concernant un support physique pour une cognition idéale, la discipline suivante toute désignée est les neurosciences. Les mécanismes en jeu au sein du cerveau peuvent guider plus précisément la modélisation.

Les neurosciences

Les neurosciences apportent des détails importants quant aux détails des mécanismes nécessaires à l'efficacité du cerveau. Comme le cerveau est la métaphore qui guide ces travaux de recherche, les neurosciences représentent une mine d'informations cruciales. Dans la partie 2.4.4.4 sur la stigmergie, et plus précisément l'apprentissage stigmergique, il est ressorti qu'une notion de distance d'influence adaptée entre les agents pouvaient être intéressante dans un contexte d'attribution des tâches (Xu et al., 2019). Ceci avait été inspiré du cerveau lui-même. En effet, le cerveau est un réseau de neurones qui se transmettent des données les uns aux autres. Mais, comme vu dans la partie concernant le connexionnisme de la Section 2.2.2, un réseau dont tous les éléments sont également connectés rencontre des limites dans la complexité fonctionnelle qu'il peut atteindre. Effectivement, le neurone n'est pas un simple relais du message qui lui est transmis à travers la synapse. Il fait la somme des signaux qui lui sont transmis à travers plusieurs synapses qui va déterminer s'il émet un signal ou non (Kandel et al., 2000). Certains signaux sont excitateurs tandis que d'autres sont inhibiteurs. Au-delà d'une valeur seuil, le neurone envoie à son tour un signal. La circulation des signaux s'exerce donc continuellement, mais pas uniformément. Il s'agit d'un juste équilibre entre excitations et inhibitions, et ainsi se forment des circuits d'échanges de différentes tailles. Ces tailles de circuits varient d'un niveau microscopique de quelques neurones à un niveau macro vis-à-vis du cerveau (Buzsaki, 2006).

Ceci fait écho à l'organisation en système multi-agent évoquée dans la Section 2.2.3 sur la modularité. En effet, des nœuds particulièrement interconnectés, appelés hubs, sont présents dans les réseaux neuronaux. Ces hubs se connectent de manière privilégiée entre eux (Sporns et al., 2007), formant ce que l'on appelle un « club de riches ». Cette expression, empruntée à la sociologie des réseaux, désigne une structure où les nœuds les plus centraux (ou les plus "riches" en connexions) tendent à être fortement interconnectés entre eux, plutôt qu'uniquement avec des nœuds moins connectés. Ce phénomène est observé malgré le fait que les connexions longues, souvent nécessaires pour relier ces hubs entre eux, soient relativement moins nombreuses et plus coûteuses en énergie que les connexions courtes.

Ceci explique la structure du support physique qu'est le cerveau et ses processus. Dès lors, la question se pose de déterminer ce qui, dans ces processus, correspond à l'expérience subjective d'un état conscient. Selon la théorie de la pensée d'ordre supérieur, un état mental est conscient lorsqu'il est métareprésentationnel (Rosenthal, 2005). C'est-à-dire qu'il correspond à des représentations de représentations, telles que « je vois une pomme » et non seulement « la pomme ». Cette théorie fait écho à la Section 2.4.4.3 sur la métacognition qui permet une autoévaluation. Il est intéressant de connaître cette théorie concernant l'objet de

la représentation, en d'autres termes, la nature de la cognition pour qu'elle s'élève à un état conscient.

Une autre théorie, complémentaire du point de vue de cette étude, apporte des indications sur la manière dont cela se traduit physiquement dans le cerveau et ses processus. Selon la théorie de l'espace de travail neuronal global, une information consciente est une information qui se diffuse de manière assez durable dans un large réseau (Dehaene & Changeux, 2011) incluant plusieurs fonctions. Cette diffusion au niveau global définit une information consciente, qui est l'objet de l'attention, par opposition à une information inconsciente qui demeure localisée. Plusieurs fonctions évoquées constituent, en s'associant en un réseau sollicité par une information, le processus de conscience. Ce processus peut se rapporter à la notion de conscience de situation de Endsley évoquée dans la Section 2.4.2. Ces fonctions permettant un état conscient du passé, du présent, du futur, de l'importance des choses ou non et permettant la concentration, sont autant de réseaux neuronaux concernant, respectivement, la mémoire long terme, les systèmes de perception, les systèmes moteurs, les systèmes d'évaluation et les systèmes attentionnels. Le processus consiste en une information isolée qui devient l'objet de l'attention et s'élève donc à un niveau supérieur en concernant toutes ces fonctions simultanément. Cette information fait donc l'objet d'un traitement plus complet et complexe par ce large réseau qui la renvoie aux processus de plus bas niveau.

Ces processus donnent une piste sur la manière dont un SMA représentant l'organisation peut apporter une conscientisation de l'organisation. Ces concepts éclairés par les neurosciences permettent de déterminer, comme le montre la Figure A.2, comment un système d'aide peut guider la collaboration de manière pertinente. Dans cet exemple, pour compléter ses connaissances initiales, l'agent 1 sollicite d'autres agents selon leur proximité fonctionnelle dans un contexte donné. Cette proximité est autre que géographique, c'est la raison pour laquelle l'agent 3, dont le seuil de déclenchement n'a pas permis une sollicitation, n'est volontairement pas représenté comme étant le plus éloigné. La connaissance individuelle de chaque agent participant est mise en relation avec celle des autres dans un processus collectif qui diffuse à son tour son produit à chaque agent. Ceci représente le cœur du processus. Des facteurs importants comme un système d'évaluations, permettant notamment l'ajustement des seuils de déclenchement, auraient également pu être représentés sur ce diagramme mais ont été omis à des fins de simplification et de clarté.

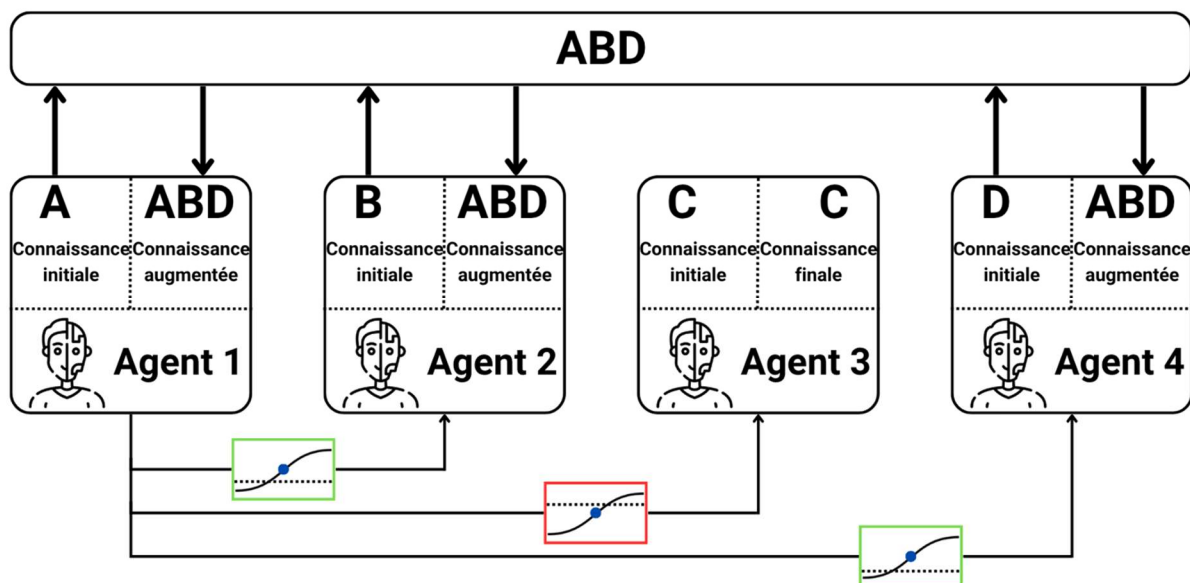


Figure A.2 : Seuils de déclenchement de sollicitations d'agents tiers pour une collaboration

De manière générale, dans les études des processus neuronaux et les théories des processus de conscience, il ressort qu'il s'agit de mises en relations en un système complexe. L'ensemble des éléments d'un système complexe biologique est usuellement nommé par un terme terminant par le suffixe -ome, comme le génome pour désigner l'ensemble des gènes composant le matériel génétique d'un organisme (Yadav, 2007). En neurosciences, le terme connectome a donc été introduit pour désigner l'architecture du réseau neuronal : les éléments neuronaux et les connexions neuronales (Sporns et al., 2005). Cette considération du connectome a pour but de mieux comprendre la cognition. Les neurosciences soulignent l'importance de la matrice des connexions cérébrales, dont les nœuds peuvent être des neurones isolés, mais surtout des réseaux de neurones de différents niveaux de complexité. Ceci souligne l'importance d'une matrice d'interconnexion des agents ou groupes d'agents dans l'organisation pour créer un processus de cognition collective.

Apport de l'approche neuroscientifique au modèle

La philosophie des sciences cognitives a montré que le concept de SMA, intégrant des agents logiciels, ne s'ajouterait pas en parallèle de la réalité existante mais s'y intégrerait complètement pour la remplacer par une nouvelle. Les neurosciences ont précisé que le point d'attention critique est ce que l'on peut appeler le connectome de l'organisation, c'est-à-dire la manière dont le SMA connecte les agents qui en font partie. Ces concepts relativement généraux clarifient l'approche de cette étude, mais elle peut encore être affinée par les autres disciplines des sciences cognitives telles que la linguistique.

La linguistique

La linguistique confirme la façon dont la connexion rend possible des processus cognitifs complexes. Cette connexion s'entend d'un point de vue tant fonctionnel que physique. En effet, dans le cerveau, la fonction Fusion (Merge) est un élément crucial de la cognition puisqu'elle permet de combiner des éléments mentaux discrets (mots, concepts) pour former des structures plus complexes (phrases, idées) en une infinité de combinaisons (Chomsky, 1995). Dans le réseau neuronal, cette fonction de fusion a une localisation. Elle a été repérée

dans la partie antérieure d'une région appelée territoire de Broca (Zaccarella & Friederici, 2015). Étant donné ces observations, il est pertinent d'examiner pourquoi l'Humain est le seul animal à pouvoir verbaliser ces éléments mentaux par le langage, du moins de manière aussi développée et précise. Il s'avère que cette aire de Broca associée à la production du langage est directement connectée à l'aire de Wernicke associée à la compréhension du langage (Geschwind, 1970). Cette connexion directe par un faisceau nerveux appelé le faisceau arqué se différencie des autres espèces et permet une coordination entre l'articulation et le son. Les idées qui se construisent par fusion d'éléments mentaux, le langage et la manière de percevoir le monde sont façonnés par des métaphores. Ces dernières ne sont en effet pas simplement des figures de style littéraires mais des structures fondamentales de la pensée (Lakoff & Johnson, 2008). Leur utilisation consciente a déjà fait ses preuves comme outil de facilitation de communication et guide de conception dans des projets techniques complexes comme la programmation informatique, en particulier au sein d'équipe interdisciplinaires (Beck, 2000). Cette étude, anthropocentrée à plusieurs niveaux, intègre elle-même ce mécanisme inspiré de la pensée humaine qui aide à appréhender et explorer des concepts complexes, en utilisant une métaphore comme fil conducteur. Au vu de l'objectif complexe d'augmentation de l'organisation par une cognition collective et des caractéristiques recherchées comme l'apprentissage, la métaphore est celle du cerveau.

Apport de l'approche linguistique au modèle

C'est sur cette piste de réflexion mise en évidence par la linguistique, menant du cerveau au groupe, que le modèle a pu se préciser jusqu'ici par la philosophie et les neurosciences vis-à-vis de sa vocation à être totalement intégré et se focaliser sur la connexion des agents. La linguistique vient corroborer le potentiel puissant des fonctions émergentes des interconnexions et souligner l'importance des métaphores dans les raisonnements. Puisque les sujets du cerveau et du groupe sont centraux, le domaine des sciences cognitives qui suit, la psychologie, s'avère particulièrement pertinent dans ce cadre.

La psychologie

La psychologie qui est l'étude des processus mentaux impliqués dans la conscience de situation comme la mémoire, la résolution de problèmes et la perception est au cœur de la problématique. Que ce soit au niveau individuel pour l'utilisabilité ou au niveau groupal pour une bonne collaboration et cognition collective (Section 2.4.4), la psychologie cognitive et la psychologie sociale sont une mine d'informations pour les caractéristiques et paramètres nécessaires au modèle. L'influence de ces caractéristiques, comme la fréquence de communication ou l'explicitation de l'information, est cruciale au niveau individuel de la performance, de la confiance et de la communication. Lorsque l'on adopte un regard global sur le réseau, les neurosciences ont confirmé l'importance primaire des modalités d'interconnexions du réseau dans un système performant.

Cette réalité au sujet du cerveau, donc interne à l'individu, semble confirmée au niveau groupal par la psychologie sociale. En effet, l'intelligence collective d'un groupe dépend plutôt de la bonne compréhension des membres entre eux que de leur intelligence individuelle (Woolley et al., 2010). Des groupes ont été testés dans une série de tâches à effectuer collectivement, comme des résolutions de puzzles visuels, brainstorming d'idées, jugements moraux collectifs, négociations ou autres tâches de raisonnement en groupe, afin de trouver un facteur d'intelligence collective dans la performance des groupes humains.

Les membres de ces groupes ont été soumis à deux tests. Le premier vise à évaluer l'intelligence individuelle et s'apparente à une version simplifiée mais tout de même robuste du test QI, pour ne durer qu'une douzaine de minutes : le '*Wonderlic Personnel Test*' (Dodrill, 1983). Le second évalue la sensibilité sociale des membres du groupe, c'est-à-dire leur capacité à interpréter les émotions et intentions d'autrui à partir d'indices visuels comme la photo d'un regard : le test '*Reading the Mind in the Eyes*' (Baron-Cohen et al., 2001).

Ces expériences ont montré une corrélation positive entre une sensibilité sociale moyenne élevée dans le groupe et une meilleure intelligence collective. Cependant, le niveau moyen d'intelligence individuelle n'est pas fortement corrélé avec l'intelligence collective, et le niveau maximal (la présence d'un individu très intelligent) n'a pas d'impact significatif. Le facteur le plus important, la bonne compréhension entre les membres, n'est pas sans rappeler le connectome dans le cerveau.

À noter que les différentes disciplines se soutiennent les unes les autres. Cette empathie interpersonnelle s'observe également en neurosciences chez deux individus qui communiquent dont le cerveau est observé par IRMf (imagerie par résonance magnétique fonctionnelle). Il y a un couplage neuronal entre deux personnes dont la communication est réussie. Autrement dit, l'activité neuronale est synchronisée : couplée spatialement et temporellement entre le locuteur et l'auditeur (Stephens et al., 2010), impliquant notamment les régions cérébrales mentionnées dans la partie sur la linguistique.

Concernant la psychologie sociale, les expériences sur l'intelligence collective ont également montré qu'elle est accrue lorsque les membres font preuve d'une répartition équitable dans la prise de parole des participants.

Apport de l'approche psychologique au modèle

La psychologie conforte le besoin d'un processus permettant l'expression et la bonne compréhension de chaque participant d'une prise de décision collaborative, comme celui de la prise de décision partagée inspirée de la littérature scientifique du domaine de la santé (Section 2.4.2). Cette partie montre également que des tests d'intelligence collective ont déjà été menés. Mais, à l'instar d'un test de QI, la mesure de cette intelligence collective s'est effectuée grâce à des tâches relativement simples et facilement mesurables. Dans un contexte d'évaluation de mises en situations réalistes et complexes, un test de cognition collective plus qualitatif s'apparentant à un test d'utilisabilité serait plus adapté qu'un test quantitatif comme ce test d'intelligence collective s'apparentant à un type de test de QI collectif. En effet, le contexte est complexe et souvent unique ou rare et la mesure de la performance n'est pas tant mesurable objectivement que par les subjectivités des experts du terrain. Le modèle doit donc favoriser la communication et la compréhension mutuelle entre les participants de prise de décisions collaborative. Cependant, ces processus de prise de décision peuvent se multiplier et impliquer un nombre important de parties prenantes, qui ne sont pas forcément disponibles simultanément. Le domaine de l'intelligence artificielle peut aider à répondre à ces problématiques.

L'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle, inspirée d'autres disciplines comme les neurosciences, peut à son tour inspirer le modèle nécessaire pour les processus de prise de décision collaborative. Comme évoqué précédemment, l'organisation peut être considérée comme un système multi-agents. En intelligence artificielle, différents modèles d'agents sont apparus pour

assurer un comportement pour évoluer de manière adéquate, apprendre et s'adapter dans leur environnement. Les différents modèles existants seront exposés plus en détail ultérieurement.

Concernant les besoins de cette étude, trois modèles d'agents sont particulièrement pertinents : l'agent cognitif, l'agent apprenant et l'agent stigmergique. L'agent cognitif utilise des représentations internes qui lui permettent de planifier et raisonner (Russell & Norvig, 2016). L'agent apprenant améliore ses performances grâce à un mécanisme d'apprentissage (Sutton, 2018). L'agent stigmergique interagit avec l'environnement et les autres agents à travers les modifications exercées sur l'environnement (Bonabeau, 1999). Le premier permet une bonne conscience de situation pour la décision, le deuxième permet un apprentissage et le troisième un apprentissage d'un agent par l'expérience des autres, c'est-à-dire un apprentissage au niveau organisationnel, une hybridation pour obtenir tous ces avantages serait pertinente et est possible (Brambilla et al., 2013).

Un agent hybride intégrant les fonctions d'un agent cognitif, apprenant et stigmergique fait émerger un système multi-agent hautement scalable et robuste face aux changements dans un environnement dynamique. Si l'agent en question est un agent machine, alors il doit intégrer ces trois modèles. Cependant, le terrain d'étude contient des agents humains, qui possèdent des fonctions propres, notamment au niveau cognitif et d'apprentissage, mais qui peuvent être augmentées par le modèle, au même titre que la stigmergie a priori inexistante. En vue d'un futur modèle de SMA, un agent hybride est envisageable en combinant ces trois modèles qui peuvent être mis en œuvre en réunissant toutes les conditions pour leur bon fonctionnement. L'humain qui possède déjà ses fonctions cognitives doit voir sa cognition améliorée par l'accès à une information provenant des autres agents, notamment via le processus de prise de décision partagée. Sa capacité d'apprentissage peut également être augmentée par son intégration à des processus à plus grande échelle. Cette intégration permet notamment la réception indirecte de retours issus de l'utilisation du produit de son travail. Enfin, si l'inclusion d'évaluations et de retours au processus décisionnel permet cet apprentissage, elle permet également la génération et l'intégration d'indicateurs stigmergiques, inspirés des traces laissées pas les insectes par exemple, comme vu dans la Section 2.4.4.4 sur la stigmergie.

Apport de l'approche par l'intelligence artificielle au modèle

Cette stigmergie dans un espace numérique permet la collaboration asynchrone, ce qui permet une augmentation de la complexité par l'augmentation du nombre de participants qui ne sont pas forcément disponibles simultanément. Ces processus décisionnels étendus dans l'espace et dans le temps permettent également un apprentissage à un niveau organisationnel et sur le long terme.

L'intelligence artificielle a précisé le type de données que les participants, ou agents, doivent avoir à disposition. En effet, lorsqu'il s'agit d'agent humain au cœur du système, il ne s'agit pas d'implémenter une intelligence artificielle de remplacement. Mais cette discipline qui a développé des modèles d'intelligence a permis de mettre en lumière les modèles et processus nécessaires à intégrer dans un SMA représentatif de l'organisation, comme des indicateurs stigmergiques. Dans le cas de l'agent humain, le processus décisionnel implémenté du système peut l'aider bien qu'il possède déjà intrinsèquement la partie agent cognitif. Il

possède également un apprentissage qui lui est propre, mais le système peut l'augmenter quant à sa mémoire ainsi que l'élargissement de sa vision. Enfin, la partie agent stigmergique jusqu'alors inexistante peut être apporté via des indicateurs stigmergiques générés à partir de l'activité et des retours, et présentés sur divers éléments de l'interface pour augmenter la connaissance via l'expérience collective. Cependant, pour qu'un tel système soit accepté dans l'organisation et que ses interfaces aient du sens, il convient d'observer les pratiques et habitudes déjà en œuvre.

L'anthropologie

La conception du SMA se veut anthropocentrée, dans le sens où l'utilisateur participe à sa conception via l'expérimentation d'un prototype, mais également où l'humain reste au centre de son fonctionnement. Cette orientation nécessite une compréhension fine du contexte humain dans lequel le système sera intégré. L'anthropologie, en tant que science cognitive attentive aux dimensions sociales, culturelles et symboliques de l'expérience humaine, offre ici un cadre pertinent pour penser l'acceptabilité et l'appropriation des technologies. Souvent rattachée aux sciences sociales, l'anthropologie est aussi considérée comme l'une des composantes des sciences cognitives (Hutchins, 1995a; Jensen et al., 2022), notamment à travers l'étude des représentations partagées, de la cognition située, ou encore de la cognition distribuée.

L'apport anthropologique se traduit d'abord par une approche holistique de l'organisation : il ne s'agit pas seulement d'intégrer des retours utilisateurs isolés, mais de comprendre les logiques collectives, les normes, les valeurs, les rituels professionnels et les dynamiques relationnelles propres à l'environnement de travail. Ainsi, au-delà de la simple ergonomie ou utilisabilité, c'est la dimension culturelle du système qui est en jeu : un dispositif bien conçu est un dispositif qui « fait sens » pour ses utilisateurs.

Les métaphores, évoquées précédemment comme outils cognitifs et de communication, prennent ici une place particulière. Utilisées dans les interfaces (par exemple le « panier » dans une boutique en ligne), elles ne sont jamais neutres, mais culturellement situées. Leur pertinence dépend de leur capacité à mobiliser des expériences partagées, des symboles reconnus, et à s'inscrire dans l'imaginaire collectif de l'organisation. De la même manière qu'il y a une cocréation entre les métaphores et l'expérience vécue dans le monde physique, il y a une cocréation entre concepteurs et utilisateurs dans le développement même du prototype, afin que celui-ci reflète les représentations et les pratiques des acteurs. Il est d'ailleurs à noter que cette thèse elle-même a recours à la métaphore, en mobilisant celle du cerveau comme fil conducteur pour structurer la réflexion : cette mise en abyme souligne la continuité entre pensée, conception et système.

Dans cette optique, une étude préalable des pratiques effectives s'avère nécessaire. L'anthropologie propose un ensemble de méthodes qualitatives adaptées à ce type d'analyse, en particulier l'observation participante, les entretiens individuels et collectifs, mais également l'analyse silencieuse et prolongée de documents, de logiciels, d'outils ou de situations de travail comme des réunions, permettant de capter des logiques parfois implicites. Ces techniques permettent de révéler des éléments souvent invisibles dans les

approches plus quantitatives : routines implicites, tensions symboliques, résistances silencieuses ou stratégies d'adaptation informelles.

Toutefois, expliciter ces savoirs n'est pas toujours aisé. Comme le soulignent plusieurs travaux en gestion des connaissances, plus un individu est expert, moins il a conscience de ses propres savoirs, ce qui rend leur élicitation difficile. Cette asymétrie, parfois qualifiée de « malédiction du savoir », est bien connue et documentée dans la littérature (Autor, 2014; Miton & DeDeo, 2022). Cela justifie d'autant plus le recours à des méthodes qualitatives souples, qui permettent de faire émerger progressivement des éléments que l'utilisateur ne formulerait pas spontanément.

Apport de l'approche anthropologique au modèle

L'intérêt de cette approche est double : d'une part, elle permet une meilleure conception initiale du prototype, en réduisant l'écart entre le modèle mental des utilisateurs et la logique du système ; d'autre part, elle favorise une intégration progressive du dispositif dans les routines organisationnelles, en permettant des ajustements contextuels et en mobilisant les utilisateurs comme co-acteurs du changement.

Enfin, cette dimension anthropologique résonne avec une approche globale de la conception, qui ne se limite pas à produire des interfaces intuitives, mais cherche à instaurer une cohérence entre les usages humains, les dynamiques organisationnelles et les technologies mises en œuvre. L'analyse anthropologique apporte ici des outils précieux pour articuler ces trois dimensions et anticiper les effets systémiques liés à l'introduction d'un nouveau dispositif.

Ainsi, loin d'être un simple complément, l'approche anthropologique s'inscrit comme un levier central dans le processus de conception, d'acceptabilité et de transformation qu'implique le SMA.

Synthèse des apports des sciences cognitives

Les sciences cognitives se sont révélées être une source importante pour structurer le raisonnement de cette étude, étant donné l'analogie choisie du cerveau pour analyser l'organisation. Puisque le résultat recherché est une organisation qui devient apprenante, avec une mémoire et des caractéristiques cognitives, la métaphore du cerveau est cohérente. Les sciences cognitives, dont l'objet d'étude est la cognition, ont donc été passées en revue dans cette partie pour préciser les caractéristiques que doit comporter le cadre de modélisation, dont la Figure A.3 fait une synthèse.

La philosophie montre qu'aujourd'hui, les simulations s'intègrent à la réalité pour la transformer, plutôt que de simplement s'y juxtaposer. La philosophie du vivant puis plus précisément des sciences cognitives, soutiennent cette idée de cocréation indissociable avec les concepts d'autopoïèse, puis d'énaction pour la cognition. Ceci souligne que tout se crée et se perfectionne par l'expérience vécue.

Lorsque les neurosciences sont analysées plus en détails, il apparaît que des seuils de déclenchement existent entre les neurones. Ceci confirme la modularité présentée dans la bibliographie, permise par une organisation multi-agents plutôt qu'une interconnexion totale et uniforme, qui permet un plus grand niveau de complexité de traitement. En effet, la manière dont les neurones sont connectés, le connectome, est au cœur du sujet. Ceci indique qu'un mécanisme de quantification peut être utilisé pour déterminer si un agent doit participer à un processus de prise de décision ou non.

Les théories de la conscience soutiennent qu'un processus conscient est un processus largement diffusé, ou une métacognition, c'est-à-dire une réflexion sur la réflexion elle-même. Ceci conforte l'intérêt d'un système focalisé sur les processus cognitifs de l'organisation.

La linguistique confirme la puissance des connexions, qu'elles soient conceptuelles, comme les objets mentaux pour former des idées plus complexes, ou physiques comme les régions cérébrales qui font émerger des fonctions telles que la parole.

La psychologie montre que cela a son importance au sein d'un groupe de personnes également. En effet, les groupes les plus performants dans des tâches collectives sont ceux dont les membres comprennent le mieux les émotions et intentions des autres, plutôt que ceux dont les membres sont les plus intelligents. Ceci est une information intéressante puisqu'elle présente un nouveau levier sur lequel il est possible d'influer. Les neurosciences confirment qu'il y a un couplage neuronal chez les personnes qui ont une bonne communication.

Des manières dont les membres d'un système multi-agents peuvent communiquer efficacement sont révélées par l'intelligence artificielle qui a étudié le comportement de systèmes multi-agents, notamment via l'apprentissage par renforcement ou la stigmergie.

Enfin, l'anthropologie vient rappeler l'importance de l'étude du terrain avant de prétendre intégrer de nouvelles pratiques, pour qu'elles soient en phase avec la culture d'entreprise, notamment les symboles et repères partagés.

Il est à noter qu'un domaine des sciences cognitive évoqué donne souvent lieu à une digression sur un autre des domaines car ils sont intimement liés et s'alimentent les uns les autres.

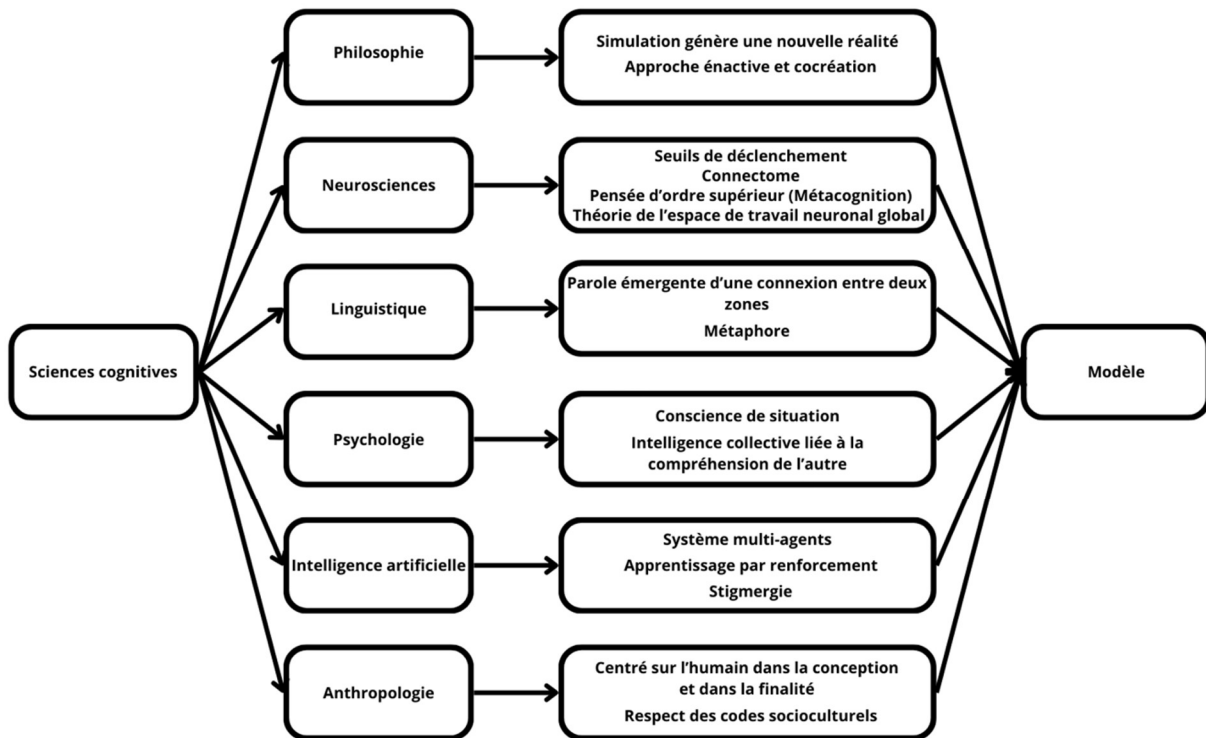


Figure A.3 : Impact des disciplines des sciences cognitives sur les caractéristiques nécessaires à la modélisation

Annexe B : Le formulaire de consentement

Formulaire de consentement

Objectif du projet et procédure

Cet entretien, d'une durée de 1 heure environ, vise à étudier votre expérience, votre ressenti pendant l'utilisation d'un outil.

Vous serez amené à répondre à des questions dont le but est de comprendre votre point de vue, vos impressions, vos avis, votre vécu, etc.

Cette étude est menée par l'Université de Bordeaux, ESTIA Institute Of Technology et Safran Helicopter Engines pour le compte de SHE (Safran Helicopter Engines) et l'ANRT (Association nationale de la recherche et de la technologie).

Anonymat et confidentialité

Toutes les données recueillies seront stockées de manière anonyme (seul votre prénom sera conservé) et confidentielle.

Risques potentiels

La participation à cette étude n'implique aucun risque connu.

Liberté de retrait

Votre participation à cette étude est volontaire. Vous êtes libre de vous retirer de cette étude à tout moment et sans justification.

Utilisation des enregistrements et droit à l'image

Vos données à caractère personnel sont traitées par ESTIA-Recherche sur la base de votre consentement (que vous pouvez retirer à tout moment) pour permettre la réalisation d'une étude anonyme sur la prise de décision. Ces données seront utilisées pour étudier l'utilisabilité d'une interface de prise de décision collaborative ainsi qu'un indicateur de retours pour la prise de décision.

Les questionnaires, comptes rendus et enregistrements sont conservés 3 mois afin d'assurer leur exploitation et de la réalisation de l'étude puis sont détruits. Ces documents sont destinés à l'ESTIA et SHE.

Vous disposez d'un droit d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, de suppression, et vous pouvez définir des directives post mortem relative à vos données. Vous pouvez exercer vos droits auprès de Quentin Lorente,

Safran Helicopter Engines / ESTIA, aux coordonnées mentionnées au bas de ce document.

Si vous estimez que vos droits ne sont pas respectés vous pouvez faire une réclamation auprès de la CNIL, TSA 80715 - 75334 PARIS CEDEX 07.

Cocher les cases si vous acceptez :

- J'autorise ESTIA et SHE à exploiter l'**enregistrement audio** dans le cadre de l'étude qu'elle mène pour faciliter la transcription et l'analyse des réponses.
- J'autorise ESTIA et SHE à exploiter **les photographies** dans le cadre de l'étude qu'elle mène pour faciliter la transcription et l'analyse des réponses.
- J'autorise ESTIA et SHE à exploiter l'**enregistrement vidéo** dans le cadre de l'étude qu'elle mène pour faciliter la transcription et l'analyse des réponses.

Accord

Je déclare avoir pris connaissance de ce formulaire de consentement et avoir compris les conditions de ma participation à cette étude. J'ai eu l'occasion de poser des questions et j'ai obtenu toutes les réponses souhaitées, le cas échéant.

Fait à _____, le _____ en 2 exemplaires.

Nom en toutes lettres :

Signatures :

Le chargé d'étude

Le participant

Pour toute question au sujet de cette étude, merci de contacter Quentin Lorente responsable de cette étude. Coordonnées [e-mail : q.lorente@net.estia.fr, téléphone : [numéro]]

Annexe C : Caractéristiques du sujet (1^{er} questionnaire)

1 - Caractéristiques sujet + Echelle cognitive de groupe

Caractérisation du sujet.

Lorsque vous soumettez ce formulaire, il ne collecte pas automatiquement vos détails, tels que le nom et l'adresse e-mail, sauf si vous le fournissez vous-même.

1. Quel est votre prénom ?

Entrez votre réponse

2. Quel est votre sexe ?

Masculin

Féminin

3. Quel âge avez-vous ?

Entrez votre réponse

4. Quel poste occupez-vous ?

Entrez votre réponse

5. Dans quel service ?

Entrez votre réponse

6. A quelle fréquence utilisez-vous des outils informatiques ?

Quotidiennement

Environ deux fois par semaine

Environ une fois par mois

Jamais

Suivant

Annexe D : Échelle de cognition collective (1^{er} et 3^{ème} questionnaires)

3 - Echelle de cognition collective

1. Prénom

Entrez votre réponse

2. Ceci est l'échelle de cognition collective (Collective Cognition Scale), identique à celle présentée avant les tests. Répondez-y en vous imaginant l'entreprise dans la situation dans laquelle elle se trouverait si le type d'outils testés précédemment étaient intégrés dans les pratiques.

	Pas du tout d'accord			Tout à fait d'accord		
1. SHE conserve et rappelle les informations importantes, telles que les détails des projets, les exigences des clients ou les délais	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. SHE a des difficultés à communiquer et partager efficacement les informations entre les membres de l'équipe ou des différents services.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. SHE s'engage souvent dans des processus collaboratifs de résolution de problèmes et de prise de décision.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Il est difficile pour SHE de s'adapter aux circonstances changeantes et d'ajuster ses stratégies en conséquence.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. SHE tire souvent parti des connaissances et des expériences collectives pour améliorer la performance globale.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. SHE n'apprend pas des erreurs passées et n'applique pas les leçons apprises dans les projets ultérieurs.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. SHE encourage une culture de partage des connaissances et d'apprentissage continu.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Les différents services ou équipes sont cloisonnés et leurs efforts devraient être mieux coordonnés et synchronisés.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. SHE utilise efficacement la technologie et les outils pour soutenir la mémoire et la collaboration.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. La performance globale de SHE en termes de mémoire, de collaboration et d'apprentissage nécessite d'être améliorée.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Annexe E : Utilisabilité (2^{ème} questionnaire)

2 - Questionnaire sur l'interface

Ce questionnaire permet d'évaluer l'interface que vous venez de tester.

1. Prénom *

Entrez votre réponse

2. Echelle d'utilisabilité du système *

	Pas du tout d'accord			Tout à fait d'accord		
1. Je pense que je vais utiliser ce système fréquemment.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Je trouve ce système inutilement complexe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Je pense que ce système est facile à utiliser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système ont été bien intégrées.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce système.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. J'imagine que la plupart des gens seraient capables d'apprendre à utiliser ce système très rapidement.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. J'ai trouvé ce système très laborieux à utiliser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Je me sentais très en confiance en utilisant ce système.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Que modifieriez-vous ? *

Entrez votre réponse

4. Remarques sur le scénario 1 - Création d'une requête et d'une option *

Entrez votre réponse

5. Remarques sur le scénario 2 - Choix de l'option parmi les propositions du cas existant *

Entrez votre réponse

Bibliographie de l'auteur

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2025). **SOMA: a multi-agent digital twin to support collaboration in helicopter engine maintenance.** *15th International Workshop on Service-Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future (SOHOMA2025)*, Aix-en-Provence, France.

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2024). **Le jumeau numérique du système sociotechnique comme support à la collaboration.** *2ème Congrès annuel de la SAGIP*, Villeurbanne, France.

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2023). **Améliorer la décision collaborative grâce à un jumeau numérique du système sociotechnique.** *Conférence internationale CIGI-QUALITA-MOSIM 2023, Trois-Rivières, Canada*. DOI: 10.60662/1ffd-sn52

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2022). **Sociotechnical System Digital Twin as an Organizational-enhancer applied to Helicopter Engines Maintenance.** *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE IEEM2022*, Kuala Lumpur, Malaysia.

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2022). **Development of a digital twin for collaborative decision-making, based on a multi-agent system: application to prescriptive maintenance.** *INCOSE International Symposium*, vol. 32, n°S1, pp. 109-117. DOI10.1002/iis2.12875

Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G., and Thermy, F. (2021). **Développement d'un jumeau numérique pour la prise de décision collaborative, basé sur un système multi-agent: application à la maintenance prescriptive.** *2èmes Journées virtuelles de la SAGIP*, Toulouse, France.