

# Modélisation multi-agent des opérations semi-autonomes dans un système cyber-physique de forage pétrolier ou gazier

Yazan Mualla<sup>a</sup>  
yazan.mualla@utbm.fr

Igor Haman Tchappi<sup>a,b</sup>  
igortchappi@gmail.com

Amro Najjar<sup>c,d</sup>  
amro.najjar@uni.lu

Stéphane Galland<sup>a</sup>  
stephane.galland@utbm.fr

Robin Vanet<sup>e</sup>  
robin.vanet@telecom-st-etienne.fr

Olivier Boissier<sup>e</sup>  
Olivier.Boissier@emse.fr

<sup>a</sup>CIAD, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France

<sup>b</sup>Faculty of Sciences, University of Ngaoundere, Cameroon

<sup>c</sup>AI-Robolab/ICR, Computer Science and Communications, University of Luxembourg, Luxembourg

<sup>d</sup>Umeå University, 90736 Umeå, Sweden

<sup>e</sup>Univ. Lyon, IMT Mines Saint-Étienne, F-42023 Saint-Étienne, France

## Résumé

Dans l'industrie pétrolière et gazière, après une certaine profondeur de forage, les températures augmentent suffisamment pour endommager les outils de forage et les processus d'atténuation ne sont plus suffisants. Dans cet article, nous proposons un système cyber-physique (SCP) où des agents sont utilisés pour représenter des entités en collaboration, à la fois en surface et en profondeur. Avec le SCP présenté, les outils souterrains répondent de manière autonome aux hautes températures avec une prise de décision démocratique décentralisée, basée sur un modèle de décision interne : chaque outil prend une décision en fonction de ses spécifications afin de supporter les hautes températures. Le SCP est implémenté en utilisant une simulation orientée-agent, et les résultats montrent qu'il est possible d'atténuer les conséquences des hautes températures en associant des mécanismes de vote et des modèles de refroidissement.

**Mots-clés :** systèmes cyber-physiques, systèmes multi-agents, opérations de forage pétrolier et gazier

## Abstract

In Oil&Gas drilling operations and after reaching deep drilled depths, high temperature increases significantly enough to damage the down-hole drilling tools, and the existing mitigation process is insufficient. In this paper, we propose a Cyber-Physical System (CPS) where agents are used to represent the collaborating entities in Oil&Gas fields both up-hole and down-hole. With the proposed CPS, down-hole tools respond to high temperature autonomously with a decentralized collective voting based on

the tools' internal decision model while waiting for the cooling performed up-hole by the field engineer. This decision model, driven by the tools' specifications, aims to withstand high temperature. The proposed CPS is implemented using a multiagent simulation environment, and the results show that it mitigates high temperature properly with both the voting and the cooling mechanisms.

**Keywords:** cyber-physical systems, multiagent systems, oil and gas drilling operations

## 1 Introduction

Dans son rapport publié en 2018, l'Agence Internationale de l'Énergie prévoit une augmentation continue de la consommation du pétrole durant les prochaines années. Cette augmentation serait essentiellement due à la hausse des demandes des industries pétrochimiques et des transports routiers et aériens [1]. Dans l'industrie pétrolière et gazière, une plate-forme est généralement utilisée pour forer un trou, appelé puits, dans la croûte terrestre à l'aide d'un outil, appelé le train de forage, afin de trouver des ressources naturelles. Lorsqu'elles sont découvertes, ces dernières sont extraites puis raffinées pour utilisation. Les puits peuvent être distingués selon qu'ils permettent un forage à basse ou à haute température. Les puits à basse température constituent une large majorité des puits existants de part le coût important des matériaux et de la technologie d'assemblage nécessaires à la réalisation d'un puits à haute température. L'augmentation du nombre de puits à basse température totalement drainés implique la progres-

sion croissante de la demande de puits à haute températures. Les températures élevées de ces derniers endommagent les outils. Ce qui génère des coûts supplémentaires dûs au temps nécessaire pour démonter, réparer et remonter l'outil endommagé. La limite de fonctionnement pratique pour les outils de forage existants est de 205 degrés Celsius. Au-dessus de cette limite, il est nécessaire d'investir dans des technologies permettant de gérer et d'atténuer les effets des hautes températures [2]. Par conséquent, les machines ont été équipées de capteurs de température, à la fois dans les outils à plusieurs kilomètres de profondeur et à la surface, afin de déterminer le taux de rafraîchissement à appliquer aux outils. Dans la plupart des systèmes existants, la gestion de la température depuis la surface repose sur un **refroidisseur de boue** qui permet de contrôler la température de la boue de forage qui est en contact avec les outils souterrains. Ce processus souffre de problèmes de réactivité. Tout d'abord, un délai est nécessaire pour que la boue refroidie atteigne le fond du puits. Ceci implique une latence entre l'instant où la température limite est atteinte et son réel refroidissement. De plus, la communication entre les composants sous-terrains et ceux en surface est basée sur un signal analogique transporté par la boue. Ce signal est non fiable (notamment dans des conditions difficiles de forage) : le signal analogique peut être bruité ou perdu.

En résumé, les outils souterrains peuvent détecter une situation problématique, voir critique, correspondant à une augmentation trop importante de la température. Toutefois, ces outils ne pouvant rien faire pour se protéger d'éventuels dommages à l'heure actuelle, il devient nécessaire de les équiper avec des mécanismes leur permettant d'éviter les cas mentionnés précédemment.

Dans le présent article <sup>1</sup>, nous proposons un système cyber-physique (SCP), tel que défini par Baheti and Gill [5], qui vise à améliorer les outils souterrains avec un mécanisme de communication permettant d'atténuer de manière autonome les effets des hautes températures, tout en contrôlant un effecteur local à l'aide d'un système de vote. Les outils sont représentés par des agents qui contrôlent les capteurs et les effecteurs embarqués dans les-dits outils. Le paradigme agent fournit la possibilité d'une solution décentralisée au plus proche des outils, en déclenchant un cycle de vote pour démarrer un effecteur local. Le résultat de chaque cycle

permettra aux agents de contrôler la montée des températures en attendant le refroidissement déclenché par l'ingénieur de forage depuis la surface. Pour implémenter fidèlement le SCP proposé, un modèle est défini avec tous les mécanismes et les paramètres du forage en situation réelle. Ces paramètres incluent la trajectoire du puits et les équations des températures de ces derniers.

Dans nos travaux antérieurs [3], nous avons proposé un modèle de contrôle multi-agent proche du temps-réel afin d'atténuer les effets des hautes températures durant le processus de forage. Nous avons alors ignoré le rôle de l'ingénieur de forage qui est responsable du refroidissement de la boue en surface. De plus, les règles de vote utilisées par les outils étaient des règles simples. En d'autres termes, notre précédent modèle de décision doit être étendu et complété par l'adjonction de fonctions d'utilité pour déterminer le niveau d'activation des effecteurs.

Cet article est organisé comme suit. La section 2 effectue un état de l'art. La section 3 inclut une description succincte des opérations de forage. La section 4 décrit le SCP proposé. La section 5 évalue le SCP proposé et discute les résultats obtenus. La section 6 tire des conclusions et propose des directions de recherche futures.

## 2 Synthèse de travaux antérieurs

Une synthèse de travaux antérieurs est présentée dans cette section. La littérature des SCPs et des Systèmes Multi-Agents (SMA) dans l'industrie pétrolière et gazière est détaillée dans la section 2.1. Les travaux liés à la théorie du choix social, et en particulier aux mécanismes de vote sont présentés dans la section 2.2.

### 2.1 SCP et SMA dans l'industrie pétrolière et gazière

Le rôle des SCPs dans des applications industrielles a été largement exploré dans la littérature [5, 6, 7]. Lee and Lapira [8] proposent d'augmenter l'interaction entre les entités d'un même système pour améliorer la compétitivité afin d'atteindre un processus manufacturier prédictif, transparent et efficace. En revanche, ces contributions sont limitées à la phase de conception, et aucune implémentation pratique n'est réalisée. Lee et al. [9] montrent comment utiliser des analyses avancées, des informations, et des réseaux informatiques afin de travailler de manière plus collaborative et résiliente. Les au-

1. Cet article est une synthèse de deux publications en anglais dans les ateliers RTcMAS-2018 [3] et CHARMS-2019 [4].

teurs proposent une architecture unifiée constituée de 5 niveaux afin de construire une implémentation du SCP. Toutefois, l'architecture proposée ne permet pas de supporter l'hétérogénéité des composants des SCPs. Dans l'industrie pétrolière et gazière, les SCPs se caractérisent par les composants physiques et des processus supervisés par la cyber-infrastructure du système, qui comprend des contrôleurs logiques programmables, des capteurs et un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA). Les données sur les propriétés du pétrole et du gaz, telles que la température, la pression, la densité et la vitesse, sont mesurées par des capteurs qui sont ensuite transmis au système de contrôle, qui applique des algorithmes pour détecter les anomalies et surveiller l'état du système. Une fois qu'une anomalie est détectée, des commandes de contrôle appropriées sont envoyées pour modifier le fonctionnement de l'infrastructure physique [10].

Dans la littérature, les SMA sont couramment utilisés pour coordonner les entités d'écosystèmes distribués, comme par exemple dans le domaine du « cloud computing » [11]. L'utilisation des SMA pour la modélisation des opérations dans l'industrie pétrolière et gazière réduit la quantité d'information à analyser par des opérateurs humains et offre un outil d'aide à la décision et une plate-forme qui permet d'effectuer des simulations de modèles. La majeure partie des travaux utilisant les SMA pour une étude de l'industrie pétrolière et gazière est d'ordre théorique. Il y a toutefois quelques applications concrètes. Par exemple, Mikkelsen and Jørgensen [12] discutent du passage à l'échelle des moyens de production de l'industrie pétrolière et gazière. Ils présentent une nouvelle application des SMA basée sur un contrôle multi-objectif intelligent. Malgré le fait qu'un grand nombre de travaux se soient concentrés sur différents aspects de la chaîne logistique et de commandement [13, 12], aucune étude (au meilleur de notre connaissance) ne s'est penchée sur les processus de forage et de production de pétrole. En dépit du fait que certains travaux ont montré que les SMA peuvent être utilisés effectivement pour la maintenance des outils [14], nous pensons que la perspective adoptée ne couvre pas la totalité des propriétés inhérentes aux SCP, notamment l'intégration des capteurs et des effecteurs physiques.

## 2.2 Systèmes de vote dans les SMA

La théorie du choix social propose un moyen permettant d'effectuer une décision collective basée sur des opinions possiblement divergentes

entre les membres d'une même communauté [15]. Le vote est défini comme un plan général, un moyen permettant de considérer et éventuellement d'agrèger les préférences des votants [16].

Dans le domaine des SMA, les systèmes de votes constituent une méthode capable de modéliser et implanter des décisions décentralisées [17]. Les agents représentent les votants avec leurs propres intérêts et objectifs. Cela veut dire que la stratégie la plus plausible pour un agent est de chercher à maximiser son utilité individuelle [18]. Quand différents agents du SMA ont des préférences différentes, voir contradictoires, il devient nécessaire d'avoir un mécanisme permettant aux agents de prendre une décision collective. Ainsi, chaque agent exprime ses préférences parmi les décisions possibles. Puis, un système de vote agrège ces préférences pour déterminer la décision collective [19].

Les règles de vote sont définies pour la gestion du processus de vote en tenant compte de propriétés telles que l'**anonymat** (les votes ne révèlent pas les votants) et la **neutralité** (chaque candidat est traité de la même manière) [20]. Les règles de vote varient selon les processus. Nous présentons ci-après les règles les plus utilisées dans la littérature des SMA :

1. **Pluralité** : Les votants effectuent un seul vote et le candidat qui obtient le plus grand nombre de votes gagne.
2. **Méthode Borda** : Chaque votant classe les candidats dans l'ordre selon ses préférences. Cet ordre donne des points à chaque candidat en fonction de la position que lui a attribué le votant. En d'autres termes, s'il y a  $m$  candidats, cela donne  $m - 1$  points au candidat classé au premier rang,  $m - 2$  points au second, et ainsi de suite. En conséquence, le gagnant est celui qui a le plus grand nombre de points [21].
3. **Méthode Condorcet** : Cette règle élit, le cas échéant, le candidat qui obtiendrait la majorité des suffrages lors du vote à l'unanimité contre chacun des autres candidats. Chaque fois qu'un tel candidat existe, il est appelé vainqueur Condorcet.

## 3 Technologies et outils de forage

L'assemblage de fond de trou (Bore-hole Assembly, BHA) est une partie du train de forage qui inclue un ensemble d'outils et des contrôleurs électroniques. Les composants du BHA, du moins profond au plus profond sont présentés dans la figure 1 :

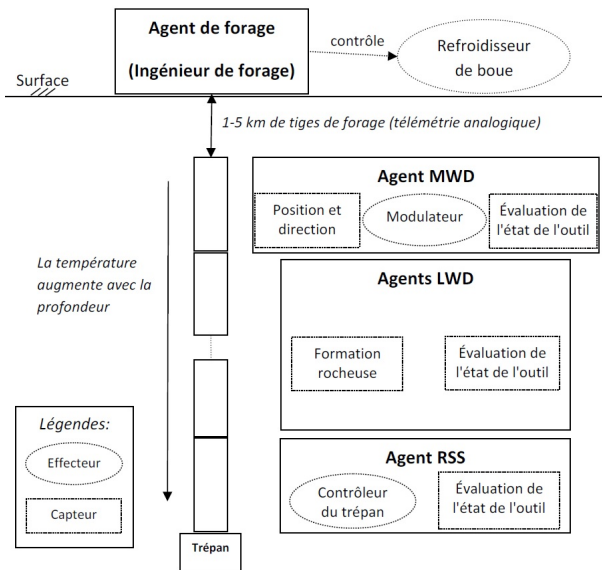


FIGURE 1 – Architecture multi-agent du SCP, adapté des travaux de Mualla et al. [3]

- **Technique de mesure pendant le forage (Measurements while Drilling, MWD) :** elle possède des capteurs qui mesurent la position et la direction de l'outil en utilisant les champs magnétique et gravitationnel de la terre. Il communique avec la surface en transmettant des données à travers un modulateur. Les méthodes de transmission varient, mais la plus courante consiste à envoyer des pulsations à travers le système de refroidissement par boue. Toutefois, le décodage du message en surface est grandement dépendant du rapport signal sur bruit, qui est affecté par les conditions de forage ;
- **Technique de journalisation pendant le forage (Logging while Drilling, LWD) :** elle est utilisée pour effectuer des mesures sur la formation rocheuse, sans arrêter le forage ;
- **Système de forage rotatif et orientable (Rotary Steerable System, RSS) :** il est utilisé pour diriger le BHA et lui appliquer une rotation par minute ;
- **Trépan de forage :** il est utilisé pour forer la formation rocheuse.

Tous les outils au sein du BHA ont des capteurs embarqués qui évaluent l'état de l'outil et mesurent les températures.

## 4 Modèle multi-agent du SCP de forage

Ce travail propose que les outils souterrains s'équipent des mécanismes permettant d'atté-

nuer de manière autonome et collaborative les effets négatifs des hautes températures sur lesdits outils. Ces mécanismes s'appuient sur un processus de vote influencé par les spécifications des outils. Ce processus est mis en œuvre dans les intervalles existants entre les décisions de refroidissement de la part de l'ingénieur de forage en surface. Cette approche est rendue possible par les capacités des équipements récents qui permettent une communication entre les outils. Ainsi, ils mesurent et enregistrent toutes les données qu'ils transfèrent au MWD pour les envoyer à surface à l'aide d'un **modulateur**. De plus, le **contrôleur du trépan** est aussi un effecteur souterrain dans le RSS. Il est responsable du contrôle de la rotation du trépan, ce qui affecte la vitesse de forage. Cette réduction de la vitesse de forage retarde la montée de température des outils. Bien que cela cause une durée de forage plus longue, l'instant où les outils atteindront un état critique est également retardé et potentiellement évité. Ainsi, les dommages subis par les outils seraient limités et permettent à ces derniers de creuser plus profondément.

La section 4.1 offre une analyse des mécaniques et des paramètres du forage. La section 4.2 présente l'architecture de vote multi-agent. De plus, les caractéristiques et les modèles de décision des agents sont précisés.

### 4.1 Modèle des mécaniques de forage

Dans la littérature du domaine de l'industrie pétrolière et gazière, il n'y a pas de modèle concret des opérations de forage [22]. Le but principal de notre modèle est de représenter fidèlement les mécaniques de forage nécessaires pour calculer la vitesse de forage et la montée de la température pendant le forage.

Dans notre travail antérieur [3], nous avons défini une terminologie de forage <sup>2</sup>

- **Profondeur mesurée (Measured Depth, MD) :** longueur du trou mesurée par des accéléromètres ;
- **Profondeur verticale réelle (True Vertical Depth, TVD) :** distance verticale entre la surface et le trépan. La TVD est particulièrement importante pour déterminer la température souterraine. Elle est calculée à partir de la MD et de l'angle de forage ;
- **Gradient de température :** taux de croissance de la température par unité de profondeur ;

2. Le premier auteur de ce manuscrit a cinq ans d'expérience dans l'industrie pétrolière et gazière.

— **Paramètres de forage** : définis par l'ingénieur forage en surface et utilisés pour contrôler le processus de forage. Trois paramètres cruciaux sont considérés dans notre modèle :

1. **Force** : représentée par le poids sur le trépan (Weight-on-Bit,  $WOB$ ), elle est appliquée au train de forage, et est contrôlée uniquement en surface.
2. **Rotation** : représentée en Rotations-par-Minute ( $RPM$ ) du train de forage, elle est contrôlée en surface et peut aussi être modifiée par les outils souterrains dans notre SCP.
3. **Débit de boue** : vitesse du flux de la boue qui circule dans le train de forage pour refroidir les outils et emporter jusqu'à la surface les éclats créés par le forage.

Selon Osgouei and Özbayoğlu [23], la vitesse de forage (ou taux de pénétration, Rate of Penetration,  $ROP$ ) est définie par l'équation 1 .

$$ROP = K \frac{\overline{WOB}^K}{a^P} r \quad (1)$$

Où  $K$  est une constante liée à la dureté de la formation ;  $\overline{WOB}$  est une fonction de  $WOB$  (équation 2) ;  $r$  est une fonction du  $RPM$  (équation 3) ;  $a^P$  est une fonction du débit de boue (équation 4).

Dans cette section, les fonctions  $\overline{WOB}$ ,  $r$  et  $a^P$  sont détaillées à partir des propositions faites par Osgouei and Özbayoğlu [23]. Les caractéristiques du trépan ne sont pas abordées étant données qu'elles ne varient pas pendant le forage. Dans l'équation 2,  $d_b$  est le diamètre du trépan (en pouce) qui ne varie pas pendant le forage.

$$\overline{WOB} = \frac{7.88WOB}{d_b} \quad (2)$$

La fonction  $r$  (équation 3) est mesurée en cycle/minute. Les facteurs  $\alpha$  et  $\beta$  permettent de modéliser la réaction du train de forage face à des formations rocheuses dures ( $\alpha = 0.428$  et  $\beta = 0.2$ ) et des formations rocheuses tendres ( $\alpha = 0.75$  et  $\beta = 0.5$ ).

$$r = e^{\frac{-100}{RPM^2}} RPM^\alpha + \beta RPM (1 - e^{\frac{-100}{RPM^2}}) \quad (3)$$

Dans l'équation 4,  $S$  est le nombre de coups de pompe,  $P$  est le débit de la pompe, et  $c$  est une constante reliée à l'efficacité de la pompe.

$$a^P = S \frac{P}{c} \quad (4)$$

## 4.2 Architecture multi-agent du SCP et coopération par votes

Dans notre SCP, un SMA est utilisé pour représenter les entités collaborantes d'un puits de forage au sein d'un système semi-autonome, en surface et sous terre (cf. figure 1).

Dans la partie inférieure de la figure 1 représentant l'espace sous-terrain, chaque outil programmable dans le BHA (MWD, LWDs et RSS) est représenté par un agent. Chacun de ces agents est responsable du contrôle des capteurs et des effecteurs embarqués dans l'outil. Chaque outil a des capteurs utilisés pour des mesures différentes : données de direction et de pilotage (MWD), de réparation et d'état (tous les outils), et de journalisation des caractéristiques de la formation (LWDs). Seul l'agent MWD contrôle le modulateur qui est responsable de la communication avec l'ingénieur de forage. De la même manière, seul l'agent RSS contrôle le trépan et sa rotation, en fonction des résultats des processus de vote.

Dans la partie supérieure de la figure 1 représentant la zone en surface, l'agent de forage représente l'ingénieur de forage. Cet agent est responsable du contrôle du processus de forage en ajustant les paramètres de forage en fonction des besoins afin d'atteindre la profondeur désirée. Additionnellement, il contrôle l'effecteur en surface, c'est-à-dire le refroidisseur de boue. Quand la boue refroidie redescend dans le puits et atteint le train de forage, elle est en contact direct avec tous les outils souterrains. Ainsi, elle refroidit les outils et transporte les déblais résultant du forage jusqu'à la surface.

L'intérêt de réduire la rotation du trépan est de ralentir la descente de l'assemblage et par conséquent de réduire l'augmentation de température. En parallèle, les outils souterrains envoient des requêtes à l'ingénieur de forage à travers le MWD afin d'augmenter la puissance fournie au refroidisseur de boue, afin de permettre un refroidissement ultérieur des outils. Cependant, entre-temps, les outils doivent prendre des mesures immédiates. Lorsqu'un outil atteint une température élevée et doit ralentir le perçage, il ne peut pas simplement demander au RSS de le ralentir car cela affectera tout le

système. Par conséquent, il doit commencer un cycle de vote pour obtenir l'opinion de tous les autres outils du système. Cela permettra une décision collective garantissant le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Bien entendu, l'exécution de la décision est effectuée uniquement par le RSS qui contrôle l'actionneur.

Les agents du système proposé ont plusieurs propriétés : (i) autonomie, (ii) décentralisation, (iii) réactivité, (iv) flexibilité, et (v) sociabilité. Le lecteur intéressé pourra se référer à [4] pour une description détaillée de ces propriétés.

### Modèle décisionnel des agents outils.

La température d'un outil à un instant donné est déterminée par la profondeur et le gradient géothermique [24]. C'est la donnée d'entrée du modèle de décision de l'agent outil. Trois niveaux de température sont définis pour chaque outil :

- **Niveau dangereux** : À l'atteinte de cette température, l'outil émet une requête auprès du MWD afin que le processus de refroidissement de la boue démarre depuis la surface.
- **Niveau critique** : Étant donné que la température à ce niveau approche la température critique, lorsqu'il détecte cette température l'agent réagit en demandant un vote entre les outils du BHA pour démarrer le contrôleur du trépan.
- **Niveau d'arrêt d'urgence** : L'outil est considéré comme définitivement endommagé et ne peut plus être utilisé.

Le modèle de décision détermine le niveau d'utilisation du contrôleur du trépan. C'est un nombre compris entre 0 et 100 représentant le pourcentage de la puissance du contrôleur du trépan. La décision d'activer le contrôleur du trépan ou de sélectionner le pourcentage de puissance est basée sur la nécessité de minimiser la consommation énergétique. En d'autres termes, si un pourcentage de puissance de 40% est suffisant pour contrôler la montée de température, le choix d'un pourcentage plus élevé doit être évité. La fonction utilisée pour déterminer la puissance désirée est formulée par l'équation 5 :

$$\frac{MaxP * (CR - TSL - TT)}{CR} \quad (5)$$

Où  $MaxP$  est la puissance maximale du contrôleur de trépan;  $CR$  est la soustraction de la moyenne des niveaux critiques de tous les outils

avec la moyenne des niveaux d'arrêt d'urgence de tous les outils. Cette valeur est constante pour un forage, car les niveaux de température (spécifications de température) sont déterminés lors de la conception et de la fabrication de l'outil;  $TSL$  est le niveau d'arrêt d'urgence de l'outil actuel;  $TT$  est la température actuelle de l'outil.

La puissance désirée du contrôleur de trépan est utilisée pour déterminer la réponse définitive du modèle. La valeur calculée sera la valeur utilisée par l'agent dans le processus de vote. Le but ultime est d'atteindre un équilibre entre deux alternatives : garder un ROP élevé, et préserver l'intégrité des outils en régulant les températures.

## 5 Évaluation et résultats

Selon Al Meshabi et al. [25], l'un des défis rencontrés par les applications dans l'industrie pétrolière et gazière est la difficulté à gérer les éléments qui opèrent sur le terrain. Un environnement de simulation offre une alternative pratique pour tester de telles applications. Par conséquent, le SCP proposé est évalué en utilisant le simulateur AgentOil [22] qui est implémenté en utilisant Repast Symphony [26], qui est un environnement de simulation à base d'agents. Le choix de cet environnement est basé sur une comparaison des différents environnements de simulation qui montrent que Repast Symphony a des avantages opérationnels significatifs [27]. Le modèle des mécaniques de forage est implémenté dans cet environnement, ainsi que les modèles de décision et le système de vote.

La section 5.1 indique les paramètres initiaux utilisés durant les expérimentations. La section 5.2 analyse en détail les deux parties de notre SCP : le vote et le refroidissement, sur toute la durée de la simulation.

### 5.1 Initialisation et paramétrage

Une exécution de la simulation représente tout le processus de forage dans une application réelle, où le BHA est préparé en surface pour forer jusqu'à une profondeur précise avant d'avoir besoin de remonter en surface pour remplacer les vieux outils du BHA par de nouveaux. Tous les paramètres de simulation ont des valeurs initiales qui peuvent être changées par l'utilisateur au début de la simulation.

Une fois que la simulation a démarré, tous les agents sont créés dans l'environnement. Un pas

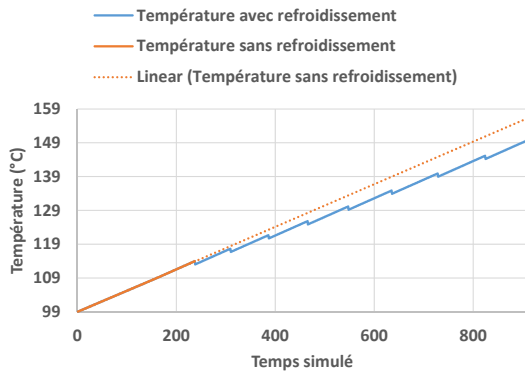


FIGURE 2 – Efficacité du refroidissement : augmentation des températures au cours du temps, avec et sans refroidissement

de la simulation correspond à une minute afin de permettre la normalisation des résultats. À chaque pas, les paramètres de forage sont mesurés (équations 2, 3 et 4) et le ROP est calculé (équation 1). Le BHA exécute le forage et la température augmente avec la profondeur. Une fois que les outils atteignent une certaine température (calculée à partir de la *TVD* et du gradient géothermique), le modèle de décision de chaque outil est exécuté et les demandes de démarrage des effecteurs (en surface et en profondeur) sont envoyées de manière à atténuer les effets négatifs des hautes températures. Une simulation peut soit se terminer par une réussite (atteinte de la profondeur recherchée), soit par un échec (un outil est tombé en panne). Dans les deux cas, un historique complet de la simulation est fourni.

Pour normaliser les résultats, le même nombre d'agents est utilisé pendant toute la simulation : en surface, un seul agent représente l'ingénieur de forage, et en profondeur : un agent pour le MWD, trois agents pour les différents LWDs et un agent pour le RSS.

## 5.2 Efficacité des mécanismes de refroidissement et de vote

Les comportements en temps réel des composants du SCP proposé sont présentés et analysés dans cette section, ainsi que leur impact direct dans l'atténuation de la température.

Il existe deux mécanismes dans notre SCP pour atténuer les hautes températures. Premièrement, le refroidisseur de boue est contrôlé par l'ingénieur de forage selon les requêtes des outils souterrains envoyées à l'agent de surface. Ensuite, en utilisant le contrôleur du trépan en profondeur pour ralentir le forage. Ce dernier

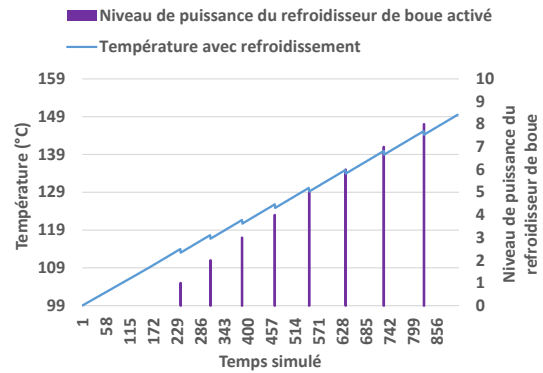


FIGURE 3 – Efficacité du refroidissement : impact du niveau de puissance du refroidisseur de boue sur les températures

est contrôlé par le RSS en fonction du résultat du vote de tous les agents du BHA. Le vote d'un agent est basé sur son modèle de décision interne, qui prend en compte la température actuelle et les spécifications de l'outil. Dans ce contexte, l'expérimentation est découpée en deux parties. Tout d'abord, pour prendre en compte l'impact du mécanisme de refroidissement, le système de vote est inhibé. Ensuite, la première partie de l'expérimentation est répliquée en activant le système de vote et en désactivant le refroidissement depuis la surface. De plus, toutes les exécutions sont effectuées avec un WOB fixe : 10k lbf qui est une valeur moyenne pour les opérations de forage.

Pour toutes les expériences, un graphique représentant la température d'un outil au cours de la simulation est construit. L'axe des abscisses représente le temps écoulé (en pas de simulation), et l'axe des ordonnées représente la température (en °C). Pour l'exécution présentée, la position de départ est de 3000m, et la température correspondant à cette profondeur est de 99°C.

### Impact du refroidissement sur les températures.

Pour le cas où le mécanisme de vote est désactivé, la figure 2 compare l'évolution de température avec le refroidissement activé (courbe bleue), et avec l'évolution des températures quand le refroidissement est éteint (courbe rouge), lorsque la température augmente de façon linéaire.

Depuis le début de la simulation, la température augmente avec le forage. Notamment, la courbe bleue commence à décroître par rapport à la courbe rouge, lorsque le refroidissement s'active au pas 238, ce qui correspond à la tem-

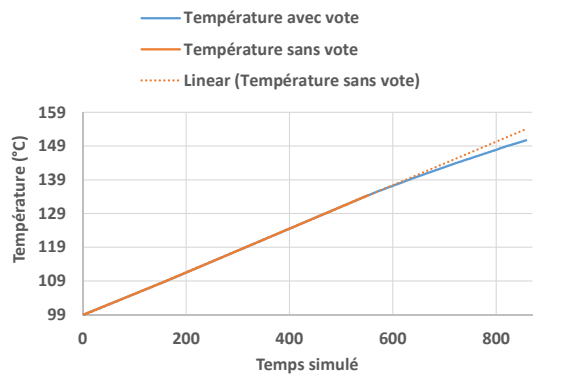


FIGURE 4 – Efficacité du vote : évolution des températures au cours du temps, avec et sans mécanisme de vote

température de 113°C.

Dans la figure 3, l'axe des ordonnées représente la puissance fournie au refroidisseur de boue. Par moments, les outils souterrains requêtent l'activation du refroidisseur de boue en surface, lorsqu'ils atteignent leur niveau de température dangereuse. Une fois que le refroidisseur de boue n'est plus alimenté, la température chute (premier effet au pas 238). Il est important de se souvenir qu'il y a un délai entre les requêtes de refroidissement, étant donné le délai pour que le message atteigne la surface et que la boue refroidie atteigne le BHA. Ceci explique l'intervalle de temps entre deux chutes de température.

### Impact du mécanisme de vote sur les températures.

Pour le cas où le mécanisme de refroidissement par boue est désactivé, la figure 4, représente la courbe de température avec vote (courbe bleue) et la courbe de température sans vote (courbe rouge). Les résultats montrent une chute de la tendance des températures grâce au mécanisme de vote.

La figure 5 fournit une représentation graphique plus détaillée sur la période 400 – 850, c'est-à-dire approximativement à l'instant avant la chute de la tendance des températures. Dans cette figure, l'axe vertical à droite représente le niveau d'alimentation du contrôleur de trépan sélectionné par le vote. Le vote commence exactement au pas 583, où la décision de démarrer l'effecteur avec un niveau de puissance de 20% est prise. À la fin de l'expérimentation, et avant d'atteindre 150°C, le niveau de puissance maximale du contrôleur de trépan est utilisé, et après cela plus aucune atténuation n'est effectuée jusqu'à la panne d'un outil.

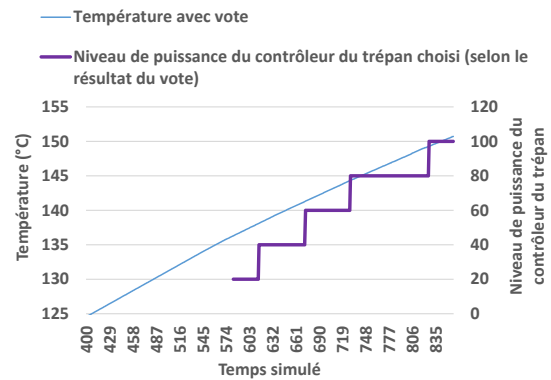


FIGURE 5 – Efficacité du vote : impact du niveau de puissance du contrôleur du trépan sur les températures

Il est important de noter que le mécanisme de vote (au niveau de la température critique) démarre après avoir déclenché le système de refroidissement (au niveau de la température dangereuse), car le refroidissement met plus de temps à agir que le mécanisme de vote.

### 5.3 Évaluation de l'efficacité du SCP proposé

Les figures 6 et 7 montrent respectivement les résultats en termes de temps et de profondeur en utilisant la simulation avec le système proposé (courbes colorées) et sans notre proposition (courbe grise). La figure 6 illustre le temps avant la panne d'un outil (en d'autres termes, combien de temps les outils ont survécu aux hautes températures). De même, la figure 7 montre la profondeur atteinte avant la panne (en d'autres termes, le niveau de profondeur foré avant la panne), ce qui constitue l'objectif principal d'un puits de forage. Dans les deux figures, trois règles de vote sont examinées : Condorcet (en vert), Pluralité (en rouge), et méthode Borda (en bleu).

La figure 6 permet de remarquer que toutes les courbes colorées sont au dessus de la courbe grise, ce qui signifie que tous les forages (avec différents systèmes de vote) sont plus efficaces que le forage sans le système proposé. Toutefois, ce résultat doit être mitigé car plus le temps de forage est grand, plus le délai pour atteindre l'objectif est long, et plus le coût financier de l'opération de forage est important. Il convient également d'analyser la figure 7 qui représente la profondeur avant la panne. Elle montre que les courbes colorées sont en dessous de la courbe grise (tendance accentuée avec un WOB élevé). Par exemple, la courbe verte (règle de Condorcet)



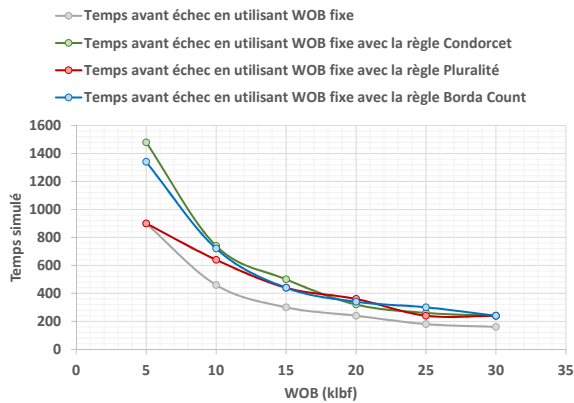


FIGURE 6 – Gains obtenus au cours du temps avec le système proposé

cet) a atteint approximativement 4356m avec un WOB de 30k lbf, ce qui représente 16m de plus que le forage sans le système proposé (courbe grise). Cette différence est vitale dans des conditions de forage extrêmes car forer 16m aussi profondément prend plusieurs heures, et chaque heure correspond à un coût financier important.

## 6 Conclusion et Perspectives

Dans les opérations de forage pour la recherche du gaz et du pétrole, la température s'accroît avec la profondeur et par conséquent endommage les outils de forage. Pour corriger ce problème, cet article a proposé un SCP où les agents sont utilisés pour représenter les entités collaboratives qui contrôlent les capteurs et les effecteurs, à la fois en surface et en profondeur. Dans le SCP proposé, le processus qui décide de demander le refroidissement en surface à un ingénieur de forage ou de démarrer un vote pour démarrer l'effecteur souterrain est gouverné par le modèle de décision de chaque agent. Les résultats démontrent que notre SCP atténue la croissance des hautes températures avec la combinaison des mécanismes du vote et du refroidissement.

Le SCP proposé est principalement utile dans le forage de puits profonds et chauds, ou avec des conditions de forage difficile, où le signal analogique entre les outils souterrains et la station de forage en surface peut être bruyant ou perdu, les mesures des capteurs ne sont plus transmises fidèlement à la surface. Nous pensons que notre modèle n'offre pas de bénéfices significatifs dans le forage de puits peu profonds, et donc moins chauds.

Comme perspectives, nous pensons que l'« Explainable Artificial Intelligence » (XAI) peut

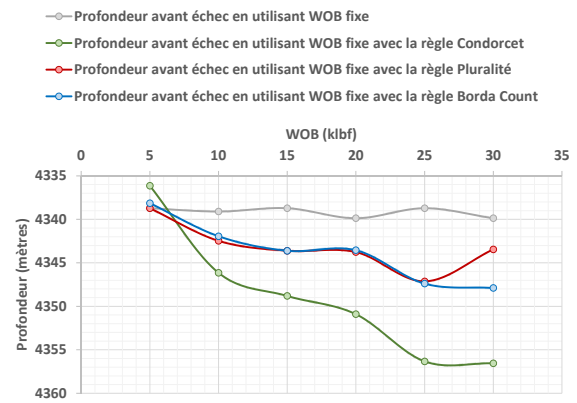


FIGURE 7 – Gains en profondeur avec le système proposé

jouer un rôle significatif dans notre modèle. Étant donné que nous opérons dans un système semi-autonome dans lequel l'ingénieur de forage possède un rôle moins complexe mais toujours décisionnel, définir un moyen de communication entre les humains et les autres entités du SCP (outils, capteur et effecteurs) est une clé de la compréhension des décisions du SCP par l'ingénieur. De plus, comme certains outils sont plus importants que d'autres au vu des rôles qu'ils jouent, nous planifions d'étendre notre modèle pour prendre ce fait en compte et implémenter un système de vote pondéré [28]. En effet, le vote pondéré permettra à un agent de diviser son vote parmi les choix qui lui sont offerts afin d'optimiser d'avantage le processus de prise de décision. Différents scénarios qui correspondent à différentes situations seront considérés. Par exemple, une distinction doit être faite entre le forage « offshore » et le forage terrestre, car dans le premier type de forage, les outils sont plus difficiles à obtenir, mais ils sont aussi plus avancés pour supporter de plus hautes chaleurs (avec un coût plus important).

## Remerciements

Ce travail est supporté par le Conseil Régional de Bourgogne France-Comté dans le cadre du projet UrbanFly 20174-06234/06242. Ce travail est partiellement supporté par le programme Wallenberg AI, Autonomous Systems and Software Program (WASP) financé par la fondation Knut et Alice Wallenberg.

## Références

- [1] International Energy Agency, "World energy outlook 2018," <https://www.iea.org/weo2018/>, 2018, accessed : 2018-11-27.

- [2] G. DeBruijn, C. Skeates, R. Greenaway, D. Harrison, M. Parris, S. James, F. Mueller, S. Ray, M. Riding, L. Temple, and K. Wutherich, "High-pressure, high-temperature technologies," in **Oilfield Review**, vol. 20. Schlumberger, 2008.
- [3] Y. Mualla, A. Najjar, R. Vanet, O. Boissier, and S. Galland, "Towards a real-time mitigation of high temperature while drilling using a multi-agent system," in **1st International Workshop on Real-Time Compliant Multi-Agent Systems**, vol. 2156. RTcMAS 2018, 2018, pp. 77–92.
- [4] Y. Mualla, A. Najjar, O. Boissier, S. Galland, I. Haman Tchappi, and R. Vanet, "A cyber-physical system for semi-autonomous oil&gas drilling operations," in **5th Workshop on Collaboration of Humans, Agents, Robots, Machines and Sensors (CHARMS 2019)**, 2019, to appear.
- [5] R. Baheti and H. Gill, "Cyber-physical systems," **The impact of control technology**, vol. 12, no. 1, pp. 161–166, 2011.
- [6] J. Shi, J. Wan, H. Yan, and H. Suo, "A survey of cyber-physical systems," in **Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on**. IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [7] B. H. Krogh, "Cyber physical systems : the need for new models and design paradigms," **Presentation Report**, 2008.
- [8] J. Lee and E. Lapira, "Predictive factories : the next transformation," **Manufacturing Leadership Journal**, vol. 20, no. 1, pp. 13–24, 2013.
- [9] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems," **Manufacturing Letters**, vol. 3, pp. 18–23, 2015.
- [10] Y. Wadhawan and C. Neuman, "Evaluating resilience of oil and gas cyber physical systems : A roadmap," in **Annual Computer Security Application Conference (ACSAC) Industrial Control System Security (ICSS) Workshop**, 2015.
- [11] A. Najjar, Y. Mualla, O. Boissier, and G. Picard, "AQUAMan : QoE-driven cost-aware mechanism for SaaS acceptability rate adaptation," in **Proceedings of the International Conference on Web Intelligence**. ACM, 2017, pp. 331–339.
- [12] L. L. Mikkelsen and B. N. Jørgensen, "Application of multi-agent systems in offshore oil and gas production," in **Proceedings of IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems**, 2012, pp. 158–163.
- [13] V. L. C. de Oliveira, A. P. M. Tanajura, and H. A. Lepikson, "A multi-agent system for oil field management," **IFAC Proceedings Volumes**, vol. 46, no. 7, pp. 35–40, 2013.
- [14] J. Barbosa, P. Leitão, E. Adam, and D. Trenteaux, "Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems : The adacor evolution," **Computers in Industry**, vol. 66, pp. 99–111, 2015.
- [15] W. Gaertner, **A primer in social choice theory : Revised edition**. Oxford University Press, 2009.
- [16] A. D. Procaccia and J. S. Rosenschein, "Junta distributions and the average-case complexity of manipulating elections," in **Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems**. ACM, 2006, pp. 497–504.
- [17] J. Lang, "Logical preference representation and combinatorial vote," **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, vol. 42, no. 1, pp. 37–71, 2004.
- [18] J. Von Neumann and O. Morgenstern, **Theory of games and economic behavior**. Princeton university press, 2007.
- [19] F. Brandt, V. Conitzer, and U. Endriss, "Computational social choice," **Multiagent systems**, pp. 213–283, 2012.
- [20] F. Rossi, K. B. Venable, and T. Walsh, "A short introduction to preferences : between artificial intelligence and social choice," **Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning**, vol. 5, no. 4, pp. 1–102, 2011.
- [21] Y. Shoham and K. Leyton-Brown, **Multiagent systems : Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations**. Cambridge University Press, 2008.
- [22] Y. Mualla, R. Vanet, A. Najjar, O. Boissier, and S. Galland, "AgentOil : a multiagent-based simulation of the drilling process in oilfields," in **Demazeau Y., An B., Bajo J., Fernández-Caballero A. (eds) Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity : The PAAMS Collection**, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10978. Springer, Cham, 2018.
- [23] R. E. Osgouei and M. Özbayoğlu, "Rate of penetration estimation model for directional and horizontal wells," in **16th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey**, 2007.
- [24] M. J. Jellison, D. R. Hall, D. C. Howard, H. T. Hall Jr, R. C. Long, R. B. Chandler, D. S. Pixton et al., "Telemetry drill pipe : enabling technology for the downhole internet," in **SPE/IADC drilling conference**. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [25] O. O. Al Meshabi, M. M. Khazindar, H. Orenstein et al., "Attitude of collaboration, real-time decision making in operated asset management," in **SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [26] N. Collier, "Repast : An extensible framework for agent simulation," **The University of Chicago's Social Science Research**, vol. 36, 2003.
- [27] Y. Mualla, W. Bai, S. Galland, and C. Nicolle, "Comparison of agent-based simulation frameworks for unmanned aerial transportation applications," in **7th International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications**. Procedia Computer Science, Elsevier, 2018.
- [28] G. W. Cox, **Making votes count : strategic coordination in the world's electoral systems**. Cambridge University Press, 1997.