

Modélisation de l'avantage tactique d'un sous-marin

Julien Botto¹, Isabelle Toulgoat², Christian Audoly¹

¹DCNS Ingénierie, Système de combat, Le Mourillon, BP Le Mourillon, BP 403, 83055 Toulon Cedex

² Systèmes Navals Complexes, Avenue Georges Pompidou, 83160 La Valette du Var, France

On considère un scénario de lutte sous-marine où un sous-marin en patrouille dans une zone maritime a pour rôle de détecter puis de pister des sous-marins intrus. Afin de mener à bien cette mission, la conception du sous-marin doit être optimisée du point de vue acoustique par rapport à la menace. La méthode classique consiste à utiliser l'équation du sonar pour estimer l'avantage acoustique, qui dépend de la discrétion acoustique et des performances sonar respectives des deux sous-marins. Dans la présente étude, une nouvelle méthode est mise au point, permettant de reproduire le scénario de manière plus réaliste en prenant en compte les algorithmes de trajectographie et le processus de décision de l'officier de quart. Pour cela, on utilise un atelier de simulation technico-opérationnelle, dans lequel la tactique de l'officier de quart est modélisée par la théorie des schémas d'Arkin. La performance globale est alors évaluée sous la forme d'un avantage tactique. Une étude paramétrique permet de mettre en évidence l'influence d'une amélioration du système d'antennes sonar, ainsi que l'influence du comportement de l'officier de quart.

1 Présentation du problème

Le scénario étudié, concernant la lutte sous-marine met en oeuvre deux sous-marins utilisant des moyens de détection acoustique sous-marine :

- Le sous-marin N°1 (celui dont on cherche à optimiser la conception), qui a pour mission de patrouiller une zone maritime dans le but de détecter, localiser puis pister des sous-marins intrus ;
- Le sous-marin N°2 (sous-marin adverse ou intrus), qui cherche à transiter dans cette même zone maritime sans être détecté.

Le sous-marin N°1 cherche à mener à bien sa mission sans être lui-même contre-détecté par le sous-marin adverse. On suppose que le sous-marin N°2 évolue en ligne droite à vitesse constante.

Dans une première phase, le sous-marin N°1 patrouille dans la zone en effectuant des trajectoires successives rectilignes, en suivant un cap aléatoire. Dès qu'il détecte le sous-marin adverse, la première tâche consiste à le localiser, c'est-à-dire déterminer non seulement son gisement, mais sa distance. Pour cela, la méthode utilisée est la trajectographie passive : le sous-marin N°1 manœuvre en réalisant une « abattée » afin de faire converger rapidement l'algorithme, qui fonctionne en quelque sorte par triangulation.

La performance de détection d'un sous-marin intrus par des moyens acoustiques dépend essentiellement :

- des conditions d'environnement (bruit ambiant, profil de célérité des ondes acoustiques dans l'eau de mer, en fonction de l'immersion, réflexion éventuelle des ondes sur la surface et sur le fond) ;
- de la discrétion acoustique du sous-marin à détecter, c'est-à-dire son niveau de bruit rayonné en champ lointain [5] ;

- des performances de détection du sous-marin étudié :
 - o gain d'antenne, dépendant de la dimension des antennes par rapport à la longueur d'onde
 - o gain de traitement
 - o niveau de bruit propre (bruit perturbateur de la plateforme sur les antennes sonar, qui vient s'ajouter au bruit ambiant).

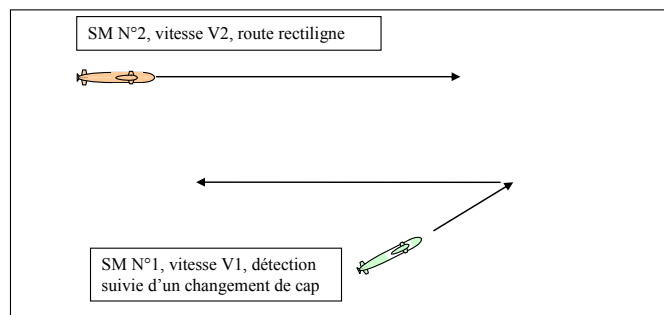


Figure 1 : première phase du scénario

Une fois le sous-marin adverse localisé, le sous-marin N°1 réalise un pistage, afin de garder le contact, et d'être en position de neutraliser le sous-marin N°2 si nécessaire.

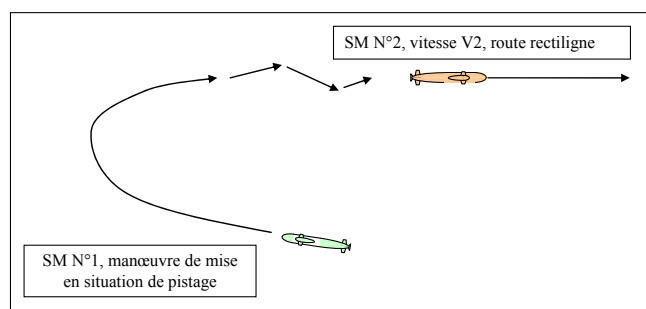


Figure 2 : deuxième phase du scénario

Pour cela, il manœuvre pour se placer dans l'arrière du sous-marin N°2, puis le suit en effectuant régulièrement des abatées de quelques dizaines de degrés. Le sous-marin N°1 doit de plus éviter de se faire contre-détecter, et pour cela il doit rester à une distance suffisante du sous-marin N°2.

Les sous-marins modernes disposent généralement de deux types d'antennes sonar de détection passive : des antennes d'étrave et des antennes de flanc.

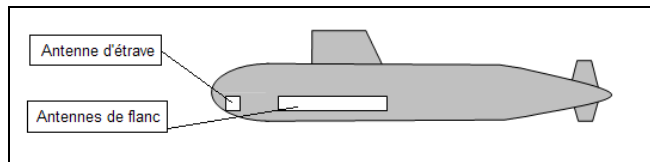


Figure 3 : antennes sonar sur sous-marins

Pour la présente étude, les sous-marins N°1 et N°2 diffèrent par les dimensions d'antennes, le niveau des bruits, et le traitement sonar. Dans l'étude paramétrique, une variante du sous-marin N°1 par rapport à la version initiale sera étudiée, comportant une antenne de flanc plus longue afin d'améliorer les performances.

Le comportement de l'officier de quart influe de différentes manières :

- par le délai de localisation ;
- par la distance choisie pour la manœuvre de contournement et le pistage ;
- par le délai pour initialiser la phase de pistage.

Ces paramètres dépendent du niveau d'entraînement de l'équipage et de l'officier de quart.

2 Evaluation de l'avantage acoustique

La méthode classiquement utilisée pour étudier ce type de problème se limite généralement à l'évaluation de l'avantage acoustique, c'est-à-dire correspondant à la phase de détection initiale. Pour cela, on évalue à l'aide de l'équation du sonar :

- la distance de détection R_1 du SM N°1 sur le SM N°2 (qui dépend du bruit rayonné BR_2 du SM N°2 et des performances du système de détection du SM N°1) ;
- la distance de détection R_2 du SM N°2 sur le SM N°1 (qui dépend du bruit rayonné BR_1 du SM N°1 et des performances du système de détection du SM N°2).

Pour des conditions d'environnement données, si R_1 est supérieur à R_2 , le SM N°1 a l'avantage acoustique.

Dans le cas de la détection passive bande large, la condition de détection obtenue par l'équation du sonar peut s'écrire sous la forme [1], [2] :

$$NBR - PT - NB + DI + GT - PS \geq IP \quad (1)$$

NBR est le niveau de bruit rayonné de la cible
PT représente les pertes de propagation dans le milieu marin

NB est le niveau de bruit équivalent isotrope sur les capteurs élémentaires des antennes

DI est l'index de directivité de l'antenne

GT est le gain de traitement

PS représente les pertes système et IP l'indice de performance (lié au seuil de détection).

Le niveau de bruit se décompose lui-même en deux composantes : le bruit ambiant BA (dépendant des conditions d'environnement), et le bruit propre BP (dépendant des caractéristiques de la plateforme et des antennes) :

$$NB = NBA \oplus NBP \quad (2)$$

Ici, le symbole $\oplus$ signifie la sommation en puissance de deux signaux non corrélés, et non la somme algébrique de quantités exprimées en dB.

L'équation (1) peut être écrite différemment :

$$PT \leq NBR - NB + DI + GT - PS - IP \quad (3)$$

Cela signifie que pour une configuration donnée, la condition de détection est vérifiée jusqu'à une certaine valeur maximum de pertes de propagation.

Pour fixer les idées, dans le cas d'un milieu isocélère (célérité indépendante de l'immersion), PT est de la forme :

$$PT = 20 \log R - a(f).R \quad (4)$$

où R est la distance entre la cible et le détecteur, et $a(f)$ un coefficient d'atténuation dépendant de la fréquence.

Cette démarche permet d'évaluer la distance maximum R pour laquelle la détection peut être réalisée.

3 Evaluation de l'avantage tactique par simulation

La méthode décrite précédemment présente un certain nombre de limitations :

- le scénario modélisé est une situation quasi-statique qui ne prend pas en compte les aspects tactiques de manière réaliste ;
- la méthode ne prend pas en compte le comportement décisionnel de l'officier de quart.

L'utilisation de cette méthode pour comparer différentes configurations de sous-marins au stade conception peut conduire à des conclusions erronées, par exemple surestimer ou sous-estimer l'impact d'un choix technique.

Pour évaluer plus finement la performance, la méthode a consisté ici à utiliser un atelier de simulation technico-opérationnelle, en implémentant des modèles adéquats.

3.1 Présentation de l'outil de simulation

Cette étude a été réalisée à l'aide de l'atelier de simulation ATANOR développé par DCNS. Cet outil comporte :

- des modèles d'environnement simulés ;
- des modèles génériques de plateformes (navires, sous-marins, avions, ...) et de menaces (missiles, torpilles...) ;

- des modèles génériques d'équipements de système de combat naval (senseurs, systèmes d'armes), par exemple des sonars ;
- un outil de création et d'animation de scénario;
- des outils d'enregistrement et d'analyse des résultats ;
- un outil de paramétrisation et de définition des jeux de calcul.

Pour chaque scénario, des analyses statistiques type Monte-Carlo sont réalisées, en faisant varier aléatoirement quelques paramètres incertains pour un même jeu de données d'entrée. L'objectif est de quantifier statistiquement, sur un grand nombre d'exécutions élémentaires de la simulation, le succès de la mission sous forme de résultats globaux. Le nombre de tirages Monte Carlo pour les simulations réalisées ici est supérieur à 1000, afin d'assurer une bonne convergence des résultats. Bien entendu, les simulations ne sont pas réalisées en temps réel, mais en temps simulé accéléré. Les grandeurs évaluées lors de la présente étude sont :

- la probabilité de succès du pistage ;
- la distance de première détection sonar ;
- le délai entre l'instant de la détection et le début de la phase de pistage ;
- la distance au début du pistage ;
- la probabilité de contre-détection.

Dans l'atelier de simulation ATANOR, un scénario est défini par la liste des acteurs et leur trajectoire au cours du temps (il s'agit ici des deux sous-marins). Les équipements de chaque acteur sont de deux types :

- non-terminaux : échangent entre eux par des messages externes ;
- terminaux : ils sont définis par une structure de données, des "méthodes" qui simulent le fonctionnement du système, et un réseau de Pétri.

Le réseau de Pétri permet de modéliser le comportement du système, et définit différentes "places" chacune représente un état du système. Un événement permet de faire passer le système d'un état à un autre, par exemple l'occurrence d'une détection change l'état du sonar. Le principe d'un réseau de Pétri utilisé dans ATANOR est représenté schématiquement ci-dessous :

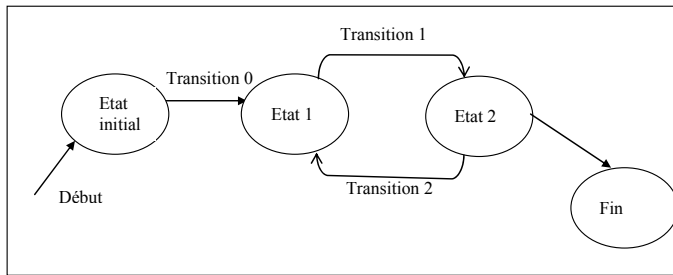


Figure 4 : Principe du réseau de Petri dans ATANOR

3.2 Modélisation du processus décisionnel de l'officier de quart

L'approche des réseaux de Pétri est trop déterministe pour modéliser de manière adéquate le comportement décisionnel de l'officier de quart. C'est pourquoi un modèle particulier a été développé ici, basé sur la théorie des schémas élaborée par Arkin en 1989 [4].

Cette méthode permet de décomposer le comportement en actions élémentaires, appelées « schémas ». Dans la

présente étude, les sorties des schémas sont la vitesse et la direction du sous-marin. La consigne finale appliquée est obtenue par arbitrage entre les sorties des différents schémas :

Soit O la position courante. Chaque schéma F_K définit :

- une fonction de direction dk , correspondant à la position P_k recherchée ;
- une fonction ik qui définit l'intensité I_K : elle module la norme du schéma en fonction de la distance OP_K ;
- un gain G_k permettant d'indiquer le niveau de priorité du schéma.

La consigne finalement appliquée est obtenue par :

$$\vec{C} = \sum_{K=1}^{\delta} \vec{F}_K = \sum_{K=1}^{\delta} G_K * I_K * \frac{OP_K}{\|OP_K\|} \quad (5)$$

Pour l'étude présentée ici, le scénario a été découpé en 4 séquences, correspondant à 4 manœuvres élémentaires :

- éviter la collision avec le sous-marin adverse ;
- élaborer la solution (à l'aide de la trajectographie) ;
- contourner le sous-marin adverse ;
- pister le sous-marin adverse.

Pour chaque séquence, différents schémas ont été définis. Les conditions d'activation sont implémentées dans deux automates, présentés ci-dessous :

Scenario sequences	Schemas	Activation condition
Collision avoidance	Collision avoidance	Submarine_phase Small_scrolling) Submarine_phase (Medium_scrolling)
Elaboration of the solution	Elaboration of the solution	Submarine_phase (Elaborate)
Bypassing of the enemy	Bypassing the enemy Target aiming	Submarine_phase (Target) Rear(NotInRear)
Tracking the enemy	Target tracking Target aiming	Submarine_phase (Target) Rear(InRear)

Tableau 1 : Conditions d'activation de chaque schéma et séquences correspondantes

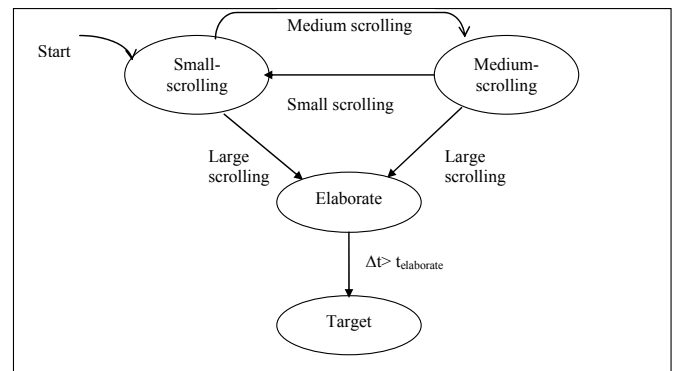


Figure 5 : automate "submarine phase"

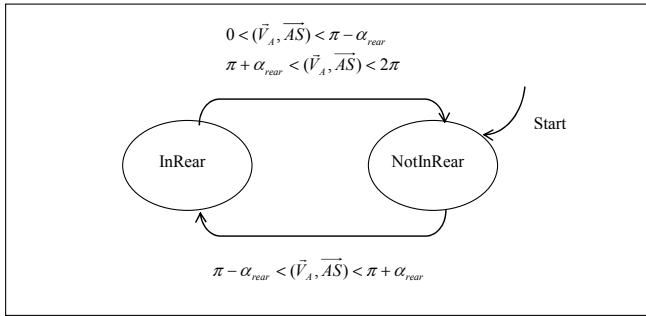


Figure 6 : automate décrivant la position du sous-marin

Pour notre étude, il est possible de définir différents comportements décisionnels pour l'officier de quart, qui pourront avoir une influence sur le résultat de la mission, en ajustant certains paramètres du modèle « théorie des schémas » défini ci-dessus :

- modèle « nominal » ;
- modèle « officier prudent » ;
- modèle « officier agressif » : se met en position favorable pour engager une arme sous-marine.

Les paramètres sur lesquels on agit sont les suivants :

- délai pour démarrer la manœuvre d'anti-collision ;
- durée pour l'élaboration de la solution ;
- distance de sécurité (par rapport à la distance maximum de détection).

4 Résultats sur un cas d'étude

Le sous-marin étudié est un sous-marin type Scorpène, propulsion diesel-électrique, équipé d'antennes sonar performantes. Le sous-marin adverse est un concurrent de type similaire. Les résultats ci-dessous sont présentés en comparant les performances obtenues avec le Scorpène « amélioré » par rapport au Scorpène « nominal ». Dans un deuxième temps, on étudie l'influence du comportement de l'officier de quart.

4.1 Avantage acoustique

Le tableau ci-dessous donne le résultat de l'évaluation de l'avantage acoustique pour les deux configurations de Scorpène, et pour les deux types d'antenne sonar (antenne d'étrave et antennes de flanc), sous la forme du ratio R_1/R_2 . On constate que le Scorpène dispose de l'avantage acoustique, la meilleure antenne sonar étant l'antenne de flanc de grandes dimensions.

Configuration Scorpène	Antenne sonar	Avantage acoustique R_1/R_2
Les deux	Etrave	1.16
Initiale	Flancs	1.5
Améliorée	Flancs	1.92

Tableau 2 : Avantage acoustique

4.2 Avantage tactique - simulations

La figure 7 représente un résultat d'une exécution élémentaire de la simulation, pour la configuration

nominale. La trajectoire vraie du sous-marin adverse au cours du temps est indiquée en rouge, et celle du Scorpène, en bleu. Les points blancs représentent la position du sous-marin adverse telle qu'elle est estimée par le Scorpène grâce à ses moyens de détection et de trajectographie. On voit que l'algorithme de trajectographie converge correctement, les traces blanches et rouges se superposant. D'autre part, le Scorpène réalise effectivement le pistage après avoir manœuvré.

4.3 Influence de la configuration d'antenne

Le tableau 3 ci-dessous présente le comparatif des mesures de performance entre la configuration nominale et la configuration améliorée, avec le comportement nominal pour l'officier de quart. Le niveau de performance a été normalisé arbitrairement à 1 pour la configuration nominale.

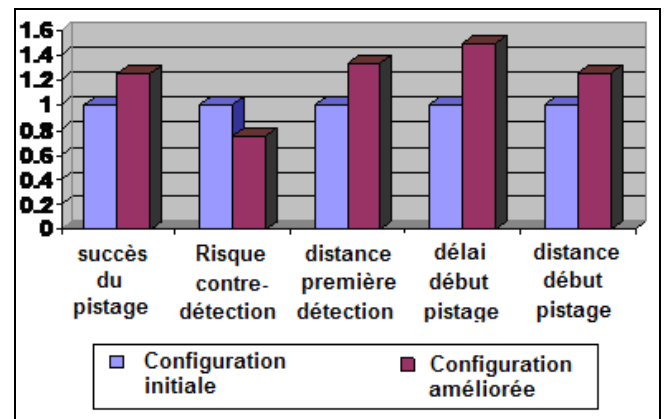


Tableau 3 : Influence de la configuration d'antenne sonar - Mesures de performance

Analyse :

- La configuration améliorée permet une augmentation de la distance de première détection, ce qui confirme le résultat du § 4.1 concernant l'avantage acoustique ;
- Le succès du pistage augmente ;
- Le risque de contre-détection diminue ;
- Le délai avant début du pistage augmente de manière importante : l'interprétation est que le comportement de l'officier étant identique dans les deux cas, il réalise la manœuvre de contournement à une distance plus grande compte tenu de la portée de détection plus grande ;
- La configuration semble moins influencer sur la distance de début du pistage.

4.4 Influence du comportement de l'officier de quart

Dans le cas de la configuration nominale, le tableau ci-dessous présente les indicateurs de performance avec trois comportements pour l'officier de quart. Comme précédemment, le résultat est exprimé en variation par rapport au cas nominal, où les indicateurs sont normalisés arbitrairement à 1.

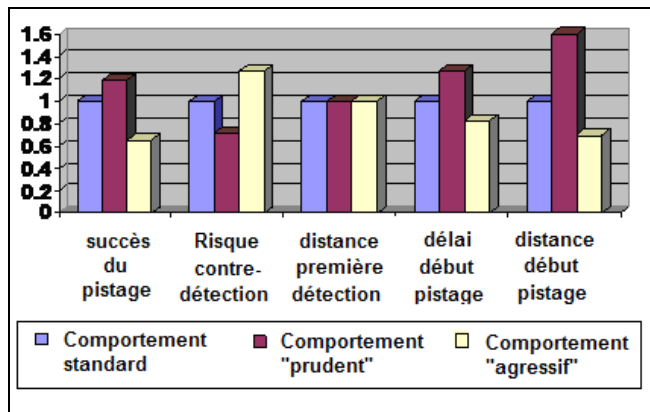


Tableau 4 : Influence du comportement de l'officier de quart - Mesures de performance

Analyse :

- Les résultats confirment l'importance de la prise en compte du comportement décisionnel de l'opérateur humain sur la performance globale ;
- Avec le comportement « agressif », on impose des durées plus courtes pour les décisions, et l'on se positionne plus près du sous-marin adverse, ce qui se traduit bien sur les deux derniers indicateurs. En contrepartie, la position du sous-marin adverse est généralement connue avec moins de précision car l'algorithme de trajectographie converge plus difficilement. Du fait de la réduction de la distance au sous-marin adverse, le risque de contre-détection augmente, et en conséquence le taux de succès de la mission diminue ;
- Le comportement « prudent » peut paraître plus approprié. En fait, tout dépend de l'objectif final de la mission. S'il s'agit en final de détruire le sous-marin adverse en lançant une torpille, ce comportement risque de faire échouer la mission, car la distance de pistage est sans doute trop grande, et le sous-marin adverse pourra plus facilement éviter la torpille.

Un exemple d'exécution de la simulation pour le comportement « agressif » est présenté sur la figure 8.

5 Conclusion

Dans le contexte de la lutte sous-marine entre deux sous-marins utilisant des moyens de détection acoustique, cette étude a permis de développer une méthode permettant d'évaluer l'avantage tactique d'un sous-marin patrouillant dans une zone maritime par rapport à un sous-marin intrus.

Contrairement à la méthode classique basée sur l'équation du sonar, qui permet d'évaluer l'avantage acoustique, en termes de distances de détection de l'un par rapport à l'autre, cette méthode repose sur un simulateur de performance technico-opérationnelle, et implémente un scénario dynamique réaliste. De plus, il permet de prendre en compte le comportement décisionnel de l'officier de quart, grâce à un modèle basé sur la théorie des schémas.

Alors que l'approche classique donne un résultat tranché, les résultats de simulation donnent des résultats globaux d'efficacité de la mission dans une approche statistique.

L'application à un cas d'étude a permis de mettre en évidence l'apport opérationnel de choix de conception, par exemple doter le sous-marin d'une plus grande antenne sonar. D'autre part, les résultats confirment que le comportement décisionnel de l'officier de quart a de l'importance, ce qui peut aider l'équipage à optimiser l'emploi opérationnel du sous-marin en cohérence avec ses moyens de détection.

Sur ce cas d'application, le couplage de modèles acoustiques (propagation sous-marine, équation du sonar) avec un outil de simulation technico-opérationnel a montré tout son intérêt. Ce type de démarche peut être transposé à d'autres problèmes de lutte sous-marine, voire à d'autres domaines de l'acoustique.

Références

- [1] Robert J. Urik, Principles of underwater sound, 3d edition, McGraw-Hill, 1983.
- [2] Xavier Lurton, Acoustique sous-marine – présentation et applications ; Publications de l'IFREMER, 1998.
- [3] George K. Bakos : Submarine approach and attack tactics – Simulation and analysis. Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1995.
- [4] R.C. Arkin, Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation. The international Journal of Robotics Research, 8(4), 92-112, 1989.
- [5] C. Dirninger, N. Touraine, S. Gautard, La discrétion acoustique des sous-marins. Revue « Acoustique & Techniques », N°48 (2007).

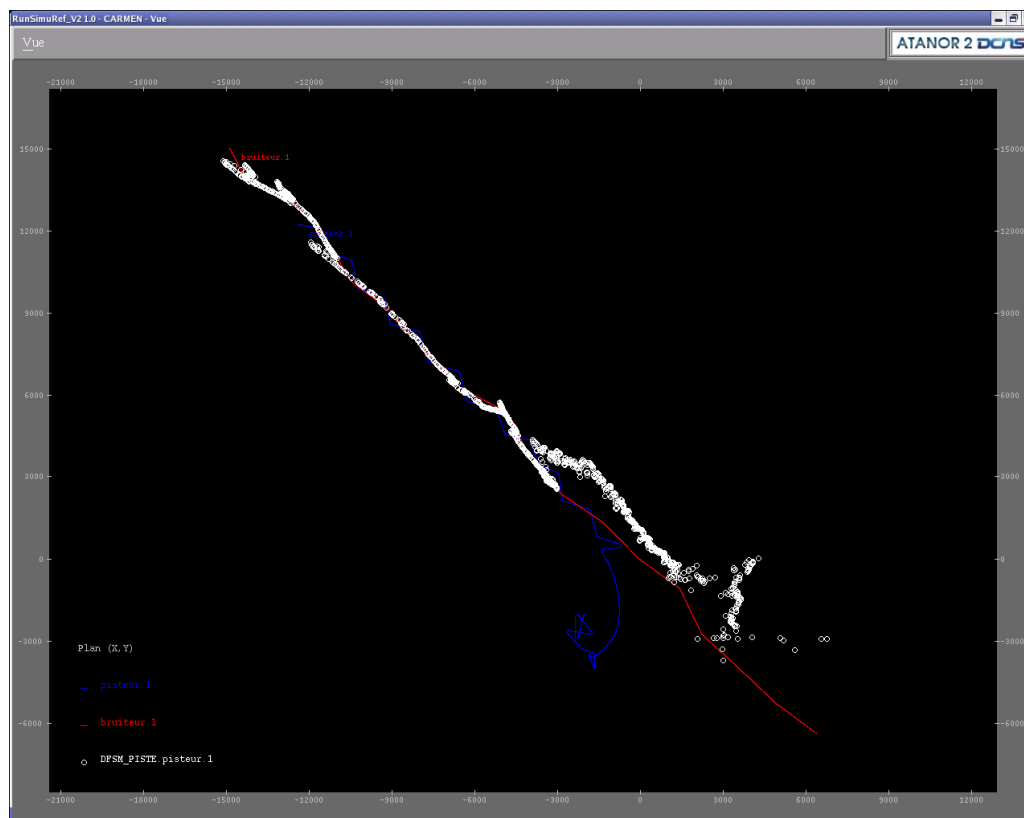


Figure 7 : Exemple d'exécution de la simulation – Configuration initiale – Comportement « standard »

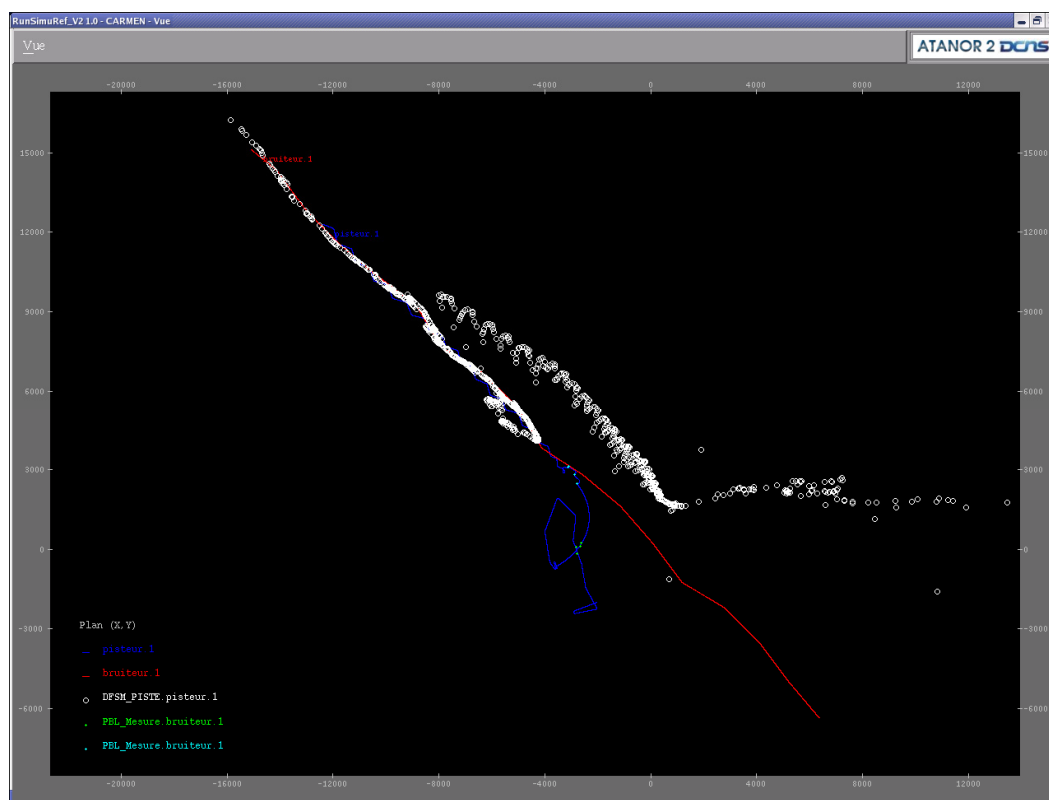


Figure 8 : Exemple d'exécution de la simulation – Configuration initiale – Comportement « agressif »