



**HAL**  
open science

# Simulation numérique en aide aux études de survivabilité des systèmes de systèmes

Thaïs Leboisselier

## ► To cite this version:

Thaïs Leboisselier. Simulation numérique en aide aux études de survivabilité des systèmes de systèmes. Congrès Lambda Mu 22 “ Les risques au cœur des transitions ” (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. <hal-03480482>

**HAL Id: hal-03480482**

**<https://hal.science/hal-03480482v1>**

Submitted on 14 Dec 2021

**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

# Simulation numérique en aide aux études de survivabilité des systèmes de systèmes

## Digital simulation helping systems of systems survivability studies

LEBOISSELIER Thaïs  
Division Système de Systèmes  
DGA Maîtrise de l'information  
Bruz, France  
email : thaïs.leboisselier@intradef.gouv.fr

**Résumé-** Une approche basée sur de la simulation numérique est proposée avec exemples pour analyser la survivabilité des systèmes de systèmes, avec pour objectif de limiter les risques liés aux agressions sur des systèmes opérationnels et d'augmenter ainsi la survie des forces armées françaises.

**Abstract –** A pragmatic approach based on digital simulation is proposed with examples to assess systems of systems' survivability, with the goal to limit risks linked to attack of our militaries and increase the survival of French forces.

**Mot-clés :** survivabilité, simulation numérique, défense, systèmes de systèmes

**Keywords :** survivabilité, digital simulation, defence, systems of systems

### I. INTRODUCTION ET CONTEXTE

Un système de système (SdS) est un ensemble de systèmes complexe dont la définition et la configuration sont évolutives, caractérisé par des comportements émergents et constitués de systèmes distribués géographiquement possédant une indépendance opérationnelle et managériale. Un exemple de SdS dans le domaine de la défense est un groupement tactique interarmes ; ou encore un groupement aéronaval. Aujourd'hui, lorsqu'au Sahel, les forces armées françaises combinent l'emploi de drones endurants, de forces spéciales, d'hélicoptères de combat, de chasseurs, de ravitailleurs, tout cela relié à des systèmes de commandements par des liaisons de données et des communications longue distance, on est déjà à l'heure du combat connecté. Demain sera fait de combat collaboratif qui fera fonctionner différentes plate-formes en réseau et en temps réel. L'enjeu de maîtriser ces systèmes de systèmes est de taille, pour que les émergences positives (la valeur ajoutée du combat collaboratif étant par exemple la recherche de précision dans un renseignement ou lors d'une frappe, ou d'augmentation de la zone d'influence par une diversité de localisation d'entités) soient supérieures aux émergences négatives liés aux risques d'utilisation de ces mêmes SdS, comme par exemple la perte d'un char, ou la perte ou l'altération ou l'interception d'un service de communication, dû à des vulnérabilités du SdS.

La survivabilité consiste à étudier la capacité d'un dispositif opérationnel à assurer sa mission et à préserver la

survie de ses constituants dans un contexte marqué par des agressions intentionnelles perpétrées par différents types de menaces. Ce type d'étude au niveau des systèmes est déjà intégré depuis de nombreuses années dès la conception, et complète les études de sûreté de fonctionnement classiques qui traite des défaillances et des accidents.

La survivabilité d'un SdS englobe toutes ces études. On peut la définir par la capacité du SdS à accomplir sa mission dans un contexte marqué par des événements indésirables (agressions intentionnelles, accidents, défaillances...) tout en préservant au mieux la survivabilité de ses systèmes constituants. Par exemple, considérons un SdS comportant deux avions de chasse complémentaires ; un mirage 2000C et un mirage 2000D ; un avion C135 ravitailleur pour les ravitaillements en vol, un drone de renseignements et un poste de commandement interalliés qui ont pour mission un « show of force ». Leur mission consiste à manifester la présence de force par un passage en altitude au dessus des troupes ennemies à basse altitude et très grande vitesse ; pouvant être suivi de frappe si nécessaire. La survivabilité de ce SdS composé d'aéronefs divers et de la chaîne de commandement est donc la capacité à effectuer ce vol à ras du sol dans un contexte de guerre où un tir ennemi peut survenir, où une défaillance peut arriver sur un avion, où un accident peut arriver (collision entre deux avions amis lors du ravitaillement)...

L'objectif des études de survivabilité des SdS, défini notamment dans [1] est de dimensionner au mieux la survivabilité des nouveaux systèmes par allocation d'un certain nombre d'exigences de survivabilité, en utilisant les trois grands niveaux de défense : Prévention (éviter que l'événement ne se produise), Résistance (lorsque l'événement se produit, en minimiser les conséquences néfastes), Reconfiguration (en présence de conséquences néfastes, recouvrer en un temps raisonnable l'état initial ou un état dégradé des capacités permettant de poursuivre la mission), sur lesquels l'enjeu est de répartir au mieux les efforts technologiques et financiers. Un exemple résultant de ce genre d'étude est de posséder un avion de chasse furtif et manœuvrant (prévention) ; mais également ayant des éléments de protection structureaux type blindage minimaux (Résistance) ; et ayant la capacité d'être réparable (reconfiguration) ; ou encore des exigences dans la

spécification des échanges radios ou des liaisons de données entre le centre de commandement et les avions de chasse pour éviter de perdre tout échange en cas de défaillance ou de brouillage ennemi.

Plusieurs études permettant d'avancer sur le sujet ont déjà été publiées, décrivant les méthodes d'analyse, présentées dans [2]. L'un des axes retenus pour améliorer la connaissance dans le domaine d'expertise de la survivabilité des systèmes de systèmes (SdS) est d'exploiter la simulation numérique, au cœur de la transition numérique de la Direction Générale de l'Armement (DGA) dans son activité d'équipement des forces armées. L'objectif est de limiter les risques d'agressions des forces armées déployées et d'augmenter ainsi la survie de l'armée française.

La survivabilité des SdS est un sujet innovant et l'outillage des études est encore limité. La présente étude consiste à créer des applications informatiques qui supervisent des simulations numériques déjà existantes (particulièrement des simulations qui animent des dispositifs opérationnels amis contre ennemis) et complètent les données de ces simulations en leur ajoutant des informations relatives au domaine de la survivabilité ; par exemple, sur une étude aéronautique, « détecté », « poursuivi par une conduite de tir », « engagé », ... Ces applications de supervision, indépendantes de la source supervisée, doivent prendre en charge les différents traitements nécessaires à l'élaboration des données de survivabilité et embarquer dans leur code les modèles qui permettent de les calculer. De plus, elles disposent d'un affichage graphique qui leur est propre et sont créées au cas par cas pour répondre à un sujet d'étude donné, pour présenter les données de manière synthétique et indépendante.

## II. TRAVAUX DÉVELOPPÉS ET PRINCIPAUX RÉSULTATS

### A. Méthode

La méthode suivie pour développer l'application informatique de la simulation SdS en survivabilité est la suivante :

M1/ Expérimentation « à la main » sur un scénario fictif d'un duel avec menace (1 ami contre n ennemis) ; avec création d'un scénario puis expérimentation des premiers éléments de survivabilité. Le développement a été réalisé en interne DGA. Cette première partie a été réalisée dans le but de voir l'intérêt de telles simulations dans le domaine de la survivabilité des systèmes de systèmes. Elle a abouti au lancement d'un plan d'étude amont (PEA) mené par la division SdS de DGA MI avec le support de Capgemini pour les développements logiciels, faisant l'objet des 4 étapes suivantes.

M2/ Étude préalable : projet de définition, justification des choix

M3 / Développement d'une bibliothèque de gestion de données et application de supervision de base de simulation.

M4 / Application concrète de supervision de simulation simple, avec données générées par l'application concrète de supervision : conception, développement, validation ;

M5/ Application et exploitation de simulation complexe supervisée grâce à un couplage avec un CGF (Computer Generated Forces) : conception, développement, validation.

Un CGF est un simulateur qui permet à des utilisateurs (typiquement des experts SdS de la DGA) de créer et de simuler des scénarios complexes et réalistes, en modélisant

ces systèmes et les processus décisionnels des différents échelons de commandement impliqués. Dans ce contexte, un scénario est la description des conditions initiales (systèmes en présence, état initial de ces systèmes, environnement naturel, situation politique, etc.) et de la chronologie des événements programmés durant l'exécution d'une simulation ou le déroulement d'un exercice militaire.

A l'heure de rédaction du document, les résultats des parties M1, M2, et M3 sont présents et suffisamment encourageants pour continuer, et sont donc détaillés dans la présente communication. La partie M4 est en cours de développement, et aura ses résultats courant 2020 qui pourront être présentés lors des présentations orales. La partie M5, quant à elle, reste à faire.

### B. M1/ Expérimentation sur un scénario d'un duel avec menace

La survivabilité d'un dispositif opérationnel évolue au cours du temps en fonction de sa relation entretenue avec ses menaces. Par exemple, la relation de survivabilité entre un avion et un radar ennemi est différente selon que ce radar le détecte ou non.

La capacité à tracer l'évolution globale de survivabilité d'un dispositif au cours d'un scénario technico-opérationnel simulé apporte une nouvelle vision du déroulement de la mission. Des éléments initialement pressentis comme dimensionnant peuvent parfois être finalement relativisés et, à l'inverse, un élément mineur peut se révéler être le déclencheur d'une chaîne d'événements à criticité croissante. Une telle connaissance se révèle utile en phase de dimensionnement des programmes d'armement pour aider à orienter les axes d'effort ou, en situation opérationnelle, pour accompagner la préparation de mission.

Cette première expérimentation a pour objectif de concevoir et d'intégrer un module de survivabilité dans le logiciel CASTOR (Capacité d'Analyse et de Simulation Technico-Opérationnelle), un logiciel exploité en interne DGA, dédié à la simulation des systèmes de systèmes.

#### 1) Le simulateur CASTOR

Le cœur de simulation du logiciel CASTOR repose sur un modèle à base d'agents amis ou ennemis qui interagissent ensemble lors du déroulement de scénarios opérationnels. Les types d'agent fréquemment rencontrés sont de type radar, conduite de tir, centre de commandement, avion, etc. Par exemple, dans le cadre de travaux d'étude portant sur un système de combat aérien, le type avion est employé pour représenter le dispositif opérationnel ami, objet principal de la simulation.

Lors de l'exécution d'une simulation, les agents réagissent en fonction d'un modèle qui leur est propre. Un radar intègre une logique de veille ; une conduite de tir intègre une logique de poursuite ; un avion présente une surface équivalent radar (SER) et intègre un modèle de pilotage pour suivre sa trajectoire de référence, etc. De fait, plus les scénarios sont représentatifs d'une réalité opérationnelle, plus le résultat final de la simulation est cohérent.

Techniquement, tous les éléments de description d'un scénario sont stockés dans un fichier et au cours d'une simulation, chaque agent exporte des données dans un dossier de restitution sous la forme de fichiers.

Pour faciliter la création de scénarios, un éditeur graphique spécialisé est utilisé. Il permet de poser avec des opérations de glisser/déplacer des agents sur un fond de carte,

régler certaines de leurs caractéristiques ou propriétés, définir des trajectoires de référence en cliquant successivement sur les points qui la composent et finalement créer le fichier de scénario dans son format natif. L'illustration en Fig.1 présente un aperçu de l'éditeur en cours d'utilisation.

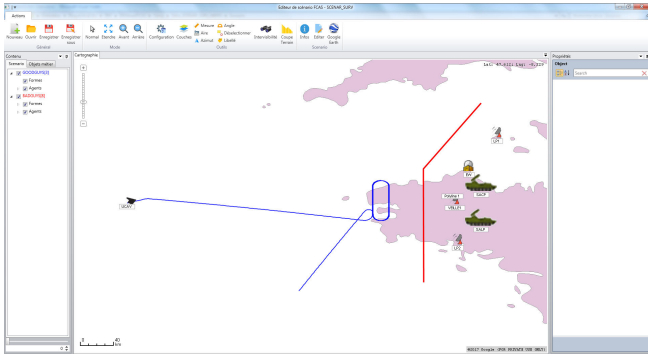


Fig. 1. Dans l'exemple illustratif proposé en Fig.1, un scénario fictif est élaboré. Scénario 1 avion contre n ennemis

Le scénario est composé d'un agent avion ami qui part de l'ouest (océan atlantique) et auquel on affecte une trajectoire à suivre, en bleu, qui lorsqu'il arrive en un certain point, vers Brest, suit une trajectoire en forme dite d'« hippodrome » sur plusieurs boucles, avant de repartir vers le sud-ouest. La ligne rouge indique une démarcation entre le camp ami et ennemi. Des agents ennemis tels que radars longue portée, radars de poursuite, systèmes d'armes sol-air sont positionnés à l'est (côté Bretagne) proches du parcours de la trajectoire. Ce scénario constitue le scénario de référence de cette étude préalable et sera cité comme tel dans la suite de cette communication. On l'appelle duel avec menace, car dans ce premier cas simple, on a un seul ami contre plusieurs ennemis, soit un système contre un système de systèmes.

L'éditeur transforme les informations saisies dans l'interface graphique en fichier de scénario valide. Plus tard, l'exécution de la simulation correspondante respectera ce scénario et conduira à obtenir dans le dossier de restitution des fichiers produits par les agents. Ces fichiers contiendront par exemple les transitions d'état datées des radars, les éventuels ordres d'engagement datés des systèmes d'armes ou encore les points de trajectoires réellement suivis par l'aéronef en fonction de ses capacités de pilotage en tentant de suivre sa trajectoire de référence.

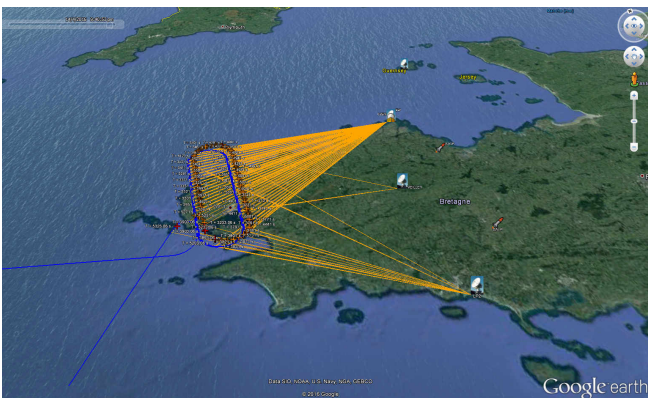


Fig. 2. Restitution de la simulation en 3 dimensions

Le résultat de ces simulations est constitué notamment de fichiers de sortie des agents. Il est ainsi possible de développer des logiciels complémentaires qui exploitent ces données par post-traitement. Plusieurs de ces logiciels complémentaires existent déjà et permettent de produire une restitution de la simulation dans un environnement en trois dimensions visualisable avec le logiciel Google Earth par exemple. L'illustration en Fig.2 présente un aperçu du scénario de référence dans ce format.

Plusieurs options d'affichage sont possibles. Les liens en jaune dans cet exemple représentent l'historique des détections de l'avion ami par les radars ennemis durant la simulation.

## 2) Notions de survivabilité

L'expression d'une mesure de survivabilité d'un système de système est complexe. Quels éléments prendre en compte ? Comment présenter les résultats ? Comment exprimer la capacité d'un dispositif opérationnel à accomplir sa mission ?

Alors que cette démarche est bien appréhendée au niveau système, des efforts restent à accomplir pour obtenir la même maturité au niveau des systèmes de systèmes. La recherche d'une fonction déterministe acceptant en entrée la totalité des paramètres influents et produisant en sortie une expression précise de la survivabilité d'un système de systèmes semble illusoire. Immanquablement, des questions relatives à la forme et à la représentativité des paramètres d'entrées et du résultat de sortie seront posées et certaines d'entre elles sont probablement insolubles.

La notion de survivabilité implémentée dans CASTOR est orientée duel avec menace. Elle prend sa source sur la base de travaux antérieurs qui ont introduit une échelle de survivabilité en cinq niveaux représentée par l'illustration en Fig.3. Chaque niveau correspond à un type de relation entretenu avec la menace.

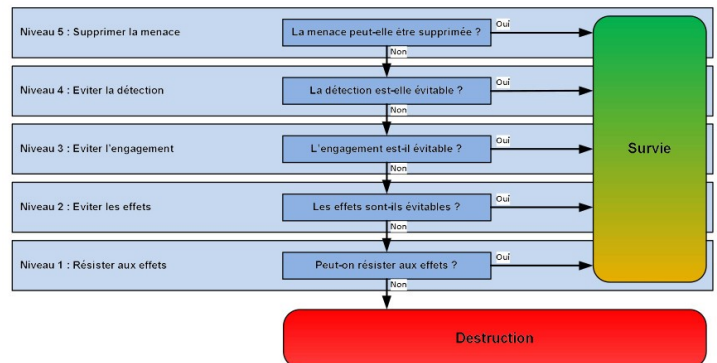


Fig. 3. Echelle de survivabilité

Le niveau 5 de l'échelle définit la relation la plus survivable d'un dispositif face à la menace. Ce niveau est atteint lorsque le système évalué peut détruire la menace. Si le dispositif n'est pas armé comme le sont par exemple certains drones de reconnaissance, le niveau 5 n'est jamais atteint.

Le niveau 4 de l'échelle est atteint lorsque le dispositif ne peut pas détruire la menace. Le maintien à ce niveau est conditionné par l'incapacité de la menace à détecter le dispositif.

Le niveau 3 de l'échelle est atteint lorsque le dispositif ne peut pas éviter la détection de la menace. Le maintien à ce niveau est conditionné par l'incapacité de la menace à engager le dispositif.

Le niveau 2 de l'échelle est atteint lorsque le dispositif ne peut pas éviter l'engagement de la menace. Le maintien à ce niveau est conditionné par la capacité du dispositif à éviter les effets de l'engagement.

Le niveau 1 de l'échelle est atteint lorsque le dispositif ne peut pas éviter les effets de l'engagement de la menace. Le maintien à ce niveau est conditionné par la capacité du dispositif à résister à ces effets. En cas d'incapacité, le dispositif est détruit.

### 3) Le module de survivabilité intégré dans CASTOR

Le module de survivabilité intégré dans CASTOR reprend le concept d'échelle de survivabilité. Il analyse par post-traitement le fichier de scénario d'une simulation et les fichiers de données des agents stockés dans le dossier de restitution de la simulation. Le résultat est fourni sous la forme de métrique indiquant l'évolution de survivabilité au cours de la simulation et d'un export pour présenter les résultats de manière visuelle.

Cette échelle est implémentée à l'aide d'une machine à état. Celle-ci prend en charge la gestion de l'état courant qui correspond au niveau de survivabilité courant du porteur ami, les transitions vers un nouveau niveau de survivabilité et l'historique des états successifs, et ceci pour chaque relation entre l'avion ami et chaque système ennemi. De fait, puisque de nombreuses données d'intérêt y sont déjà réunies, l'accès à des machines à état est proposé parmi les métriques fournies en résultat.

Le résultat final de l'étude de survivabilité produite par le module est accessible via une machine à état de synthèse qui reflète l'évolution globale du niveau de survivabilité du scénario.

L'architecture correspondante mise en œuvre dans le cadre du scénario de référence est présentée dans le schéma de principe en Fig.4.

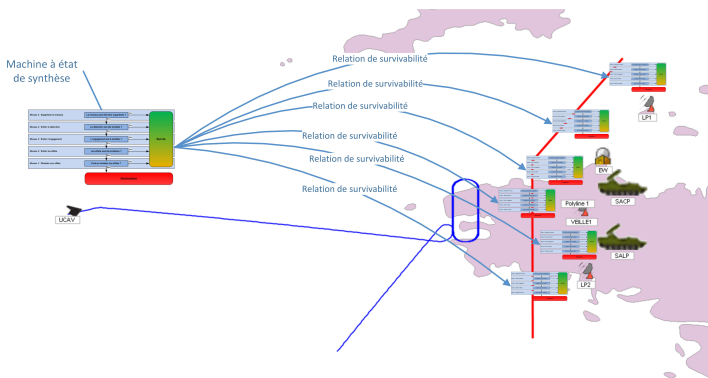


Fig. 4. Machine à état de survivabilité

En conclusion, le scénario de référence « duel avec menace » a permis de valider un résultat final ayant un sens, qui exprime une synthèse du duel qui a opposé l'avion à ses menaces. L'expérimentation a permis de retenir des axes d'amélioration par itération d'essais successifs, améliorant l'échelle de survivabilité. Par exemple, il est apparu qu'il manquait un niveau à l'échelle de survivabilité pour refléter le cas où il n'y a pas encore de relation entre l'avion et une menace. Autre résultat, avec un rendu plus graphique du scénario, en Fig.5, on peut conclure que dans les virages de l'hippodrome, le niveau de survivabilité baisse, dû au fait que l'avion présente une surface équivalent radar différente dans les virages et que dans cette configuration, les conduites de tirs ennemies sont alors capables d'accrocher l'avion.



Fig. 5. Rendu graphique du scénario de survivabilité 1 contre n

Produire la même synthèse avec la même échelle de survivabilité appliquée cette fois à un système de systèmes ami aurait-il du sens ? Le résultat obtenu permettrait certes de connaître le niveau de survivabilité le plus bas qu'a connu l'un des éléments amis durant la simulation, mais permettrait-il de déterminer si la mission a été globalement survivable ? Peut-on considérer par exemple qu'une mission est un échec lorsque des drones armés sur le retour d'une mission de bombardement réussie voient l'un des leurs engagé et détruit par l'ennemi ? La question doit être instruite en profondeur, mais le doute existe sur le fait que le périmètre couvert par une échelle de survivabilité puisse s'appliquer indifféremment à un système et un système de systèmes. L'étude de scénario à cardinalité n vers p mettant en œuvre un système de systèmes contre un autre nécessitera vraisemblablement la conception d'échelles de survivabilité supplémentaires et le développement de fonctions de transfert pour intégrer et exploiter les résultats.

Par ailleurs, le module de survivabilité développé lors de cette expérimentation a démontré la possibilité technique d'ajouter une analyse de survivabilité aux simulations existantes, avec des scénarios existants déjà par ailleurs. Ces résultats concluants ont permis de lancer un plan d'étude amont (PEA) pour systématiser ce genre de simulation de survivabilité. En effet, l'expérimentation telle que réalisée a montré un résultat intéressant, mais a demandé de nombreuses heures de développements spécifiques. L'objectif premier du PEA est de réaliser un démonstrateur validant la faisabilité de modules réutilisables d'une étude de survivabilité à l'autre.

La première étape de ce PEA est la définition de l'architecture informatique.

### C. M2/ Etude préalable : projet de définition, justification des choix

#### 1) Objectif

L'objet du PEA consiste en la création d'application informatique qui supervise des simulations numériques déjà existantes (particulièrement des simulations qui animent des dispositifs opérationnels amis contre ennemis) et complètent les données de ces simulations avec des informations relatives au domaine de survivabilité. Ces applications de supervision, indépendantes de la source supervisée (c'est-à-dire la simulation déjà existante), doivent prendre en charge les différents traitements nécessaires à l'élaboration des données de survivabilité et embarquer dans leur code les modèles qui permettent de les calculer. De plus, elles disposent d'un affichage graphique qui leur est propre et sont créées au cas par cas pour répondre à un sujet d'étude donné, pour présenter les données de manière synthétique et indépendante. L'évolution par rapport à l'expérimentation « à la main » citée précédemment est de taille : il s'agit de

créer des briques de bases logicielles, ré-utilisables et non pas de coder longuement à chaque nouvelle étude de survivabilité ; et par ailleurs d'étendre les analyses de post-traitement réalisées dans l'expérimentation duel avec menace précédente à trois types d'analyses : 1/ des analyses soit en temps réel (en cours de simulation donc) car c'est un type d'outil majoritairement utilisé, 2/ en post traitement pour les simulation qui produisent des résultats dans des fichiers de sortie (objet de l'expérimentation duel avec menace précédente); 3/ de réaliser des cas simples ou de test sans avoir recours à une simulation existante. En un mot, l'objectif du PEA est d'outiller l'expert survivabilité des SdS pour réaliser des analyses rapidement et adaptées à la réalité des programmes d'armement d'aujourd'hui.

Il est à noter que la manière dont a été conçu le PEA est ré-utilisable à d'autres domaines d'expertise : l'idée de faire une « surcouche » métier à une simulation existante par des briques de bases pourrait tout à fait être réutilisée et adaptée à d'autres métiers techniques proches, tels que la sécurité par exemple mais pourquoi pas également à d'autres métiers.

L'étude préalable de ce PEA permet de vérifier que l'architecture des éléments logiciels à concevoir et développer est bien maîtrisée.

## 2) Architecture applicative

Le système de supervision de la survivabilité est en interface avec des simulations de type CGF (Computer Generated Forces). Il récupère des informations concernant les entités à étudier en s'abonnant à un bus HLA (High Level Architecture – l'architecture de haut niveau est une norme de simulation distribuée). L'architecture HLA permet de définir des données accessibles à l'ensemble des participants à la simulation (nommés « fédérés ») dans un « dictionnaire » spécifique appelé FOM (Federation Object Model), tout en limitant le volume des échanges par un mécanisme d'abonnement aux seules données intéressant un fédéré donné via le « noyau central » de l'architecture, le RTI (Run Time Infrastructure). La spécification d'interface HLA, le RTI (Run Time Infrastructure), décrit le protocole de communication, tandis que le FOM (Federate Object Model) décrit le modèle des données échangées.

Les applications qui composent le système de supervision sont décomposées en 3 parties, illustrées en Fig.6.

A gauche, les blocs représentent les différentes sources de données susceptibles d'être exploitées par une application concrète de supervision de simulation. Le but d'une source de données est de lire les données d'une simulation dans son format propriétaire puis de les adapter pour être exploitées par une application concrète de supervision. La nature de la source de données réellement exploitée par une application concrète de supervision dépend de la nature de la simulation supervisée.

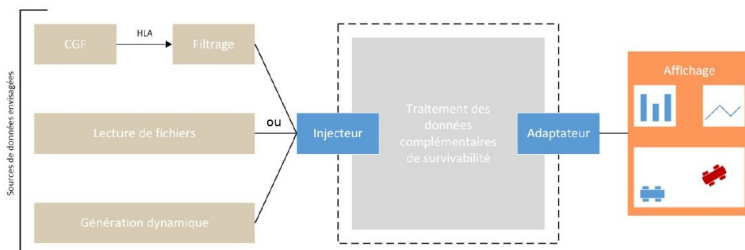


Fig. 6. Architecture applicative

Dans le cas d'une supervision de simulation fournie par un CGF (premier cas en haut), la source de données est issue d'une fédération HLA. Dans ce cas, une fonction supplémentaire de filtrage et de tri est nécessaire afin de sélectionner les éléments exploités par l'application concrète de supervision. Par ailleurs, l'application n'envoie aucune information vers la fédération, l'écoute n'a alors aucune conséquence sur la simulation source supervisée CGF et n'impose aucune contrainte sur son utilisation. On se place donc juste en « observateur » de la simulation source.

Dans le cas de l'exploitation d'une simulation dont les résultats sont enregistrés dans des fichiers de sortie, du code est développé afin de s'adapter à la structure spécifique de ces fichiers.

Enfin, une application concrète de supervision doit également pouvoir générer elle-même les données de simulation à superviser et ne pas devoir recourir systématiquement à un simulateur tiers. Cette fonctionnalité est utile pour tester des cas simples de scénario.

Dans tous les cas, et quel que soit le type de la source de données employée, les informations supervisées sont acheminées via un des injecteurs vers un cœur de calcul représenté au centre sur le schéma. Ce cœur de calcul est codé au cas par cas dans le but de produire des données complémentaires de survivabilité. La structure interne des données manipulées par ce cœur de calcul ne doit pas dépendre de la structure des données supervisées. C'est pourquoi l'acheminement des données supervisées vers le cœur de calcul est réalisé par un injecteur. Son rôle est de transformer les données supervisées en données compatibles avec la structure interne utilisée par le cœur de calcul.

Enfin, à droite de la figure, l'affichage de l'application concrète de supervision est lui aussi codé au cas par cas afin de répondre au besoin du cas d'étude. Des composants visuels tels que des grilles de données, des graphiques, ou des projections géographiques sont affichés afin de représenter les données complémentaires produites par le cœur de calcul. Ces composants visuels sont compatibles avec la structure de données utilisée par le cœur de calcul. Dans le cas d'affichage complexe, un adaptateur peut toutefois être employé afin de mieux préparer les données produites par le cœur de calcul avant de les représenter.

## D. M3 / Développement d'une bibliothèque de gestion de données et application de supervision de base de simulation.

Le développement de cette partie a pour objectif de fournir un ensemble de bibliothèques génériques et réutilisables qui permettent : la définition du modèle de données de survivabilité et les traitements de calcul de celle-ci ; la définition d'injecteur de données générique, et un cas concret d'implémentation avec une application d'injection de données depuis un fichier produit par une simulation (qui ne serait pas exemple pas compatible HLA) ; la définition d'un ensemble de composant de représentation visuelle des données de survivabilité, utilise dans une application de visualisation. Il s'agit donc de retrouver la fonctionnalité de pouvoir traiter par post-traitement une simulation existante, à l'instar de ce qui a été réalisé en expérimentation CASTOR, avec l'exemple d'une situation aérienne duel avec menace.

### 1) Modèle de données survivabilité

Dans le modèle de données, les informations suivantes sont modélisées :

- les entités de la simulation ; avec la position géographique de l'entité et ses effecteurs attribués. Un exemple d'entité ici est typiquement un char, un radar, un brouilleur, un avion, un navire, ou encore un champ de mines.

- les caractéristiques des effecteurs ; c'est-à-dire les caractéristiques d'un moyen permettant de produire un effet dans une zone : le type d'effet (par exemple, détection, ciblage, brouillage, destruction), la force ou la probabilité de produire l'effet souhaité, la forme/surface géométrique de l'effet. Par exemple, pour un char, on considère un effecteur de type destruction, avec pour zone d'effet un secteur dépendant de l'orientation de l'arme principale et de sa portée. Un autre exemple serait un brouilleur avec une distance de brouillage sur une surface circulaire.

- la zone d'effet, c'est-à-dire l'emplacement et la surface où l'effet est produit. L'emplacement de l'effet peut être déduit de la position de l'entité qui produit l'effet, et la surface est définie par les caractéristiques de l'effecteur. De même, la force de l'effet est associée à la zone de l'effet en reprenant cette caractéristique dans l'effecteur.

- la mesure d'un effet (MOE, Measure of effect) consiste à identifier un événement qui survient lorsqu'une entité cible subit un effet produit par une entité source. La MOE caractérise donc : une entité source, une entité cible, un type d'effet obtenu, la force de l'effet obtenu. Parfois un simulateur sera capable d'indiquer quand une entité peut détecter une autre, mais cette information peut également être calculée en interne par l'application de survivabilité, par exemple si elle dispose d'un modèle plus fin.

- l'historisation des mesures des effets

- l'historique des positions, chaque entité conserve un historique de ses positions passées.

- l'état de survivabilité d'une entité, qui permet de connaître l'état de survivabilité d'une entité à un instant T.

- l'historique des états de survivabilité d'une entité dans le temps, ce qui permet de voir l'évolution de la survivabilité de l'entité.

Ces données sont stockées dans un serveur de données illustré dans la Fig. 7. Dans l'objectif de pouvoir paralléliser, voir distribuer les traitements un paradigme de programmation orientée acteurs est utilisé.

Cette approche donne à un acteur trois caractéristiques principales :

1/ Il possède un état interne, il est donc en mesure de stocker des informations.

2/ Il peut réaliser des traitements sur demande ou sur éléments.

3/ La communication entre ou avec un acteur utilise une file de messages qui garantit par construction que chaque message est traité séquentiellement (les messages sont émis de manière asynchrone).

La partie haute permet l'arrêt/démarrage du serveur. La partie basse permet :

- Le paramétrage du serveur avec le choix du point de vue de l'observateur, qui permet de définir les camps Amis/Ennemis et le choix de la stratégie de mesure des effets à utiliser.

- La stratégie de mesure des effets permet de choisir l'algorithme utilisé pour la détection des effets.

- L'affichage des logs des modules spécifiques Survivabilité et ceux du serveur d'acteurs.

- L'affichage des informations de télémétrie (informations sur les statistiques de contenu du serveur)

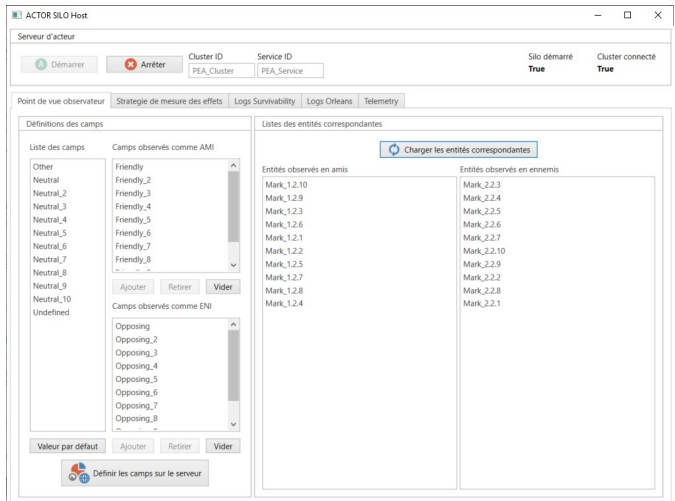


Fig. 7. Le Serveur de données

## 2) Injecteur

La capture d'écran suivante en Fig. 8 présente l'application permettant l'injection de données de test.

La partie haute permet :

- La connexion au serveur d'acteur

- La gestion de l'injecteur (démarrage, arrêt, pause, reprise)

- L'affichage des paramètres de l'injecteur

La partie basse, permet le paramétrage de l'injecteur à utiliser :

- Pour le chargement des entités dans leur état initial

- Pour la génération des mouvements des entités

Dans la capture ci-dessous l'injecteur est connecté au serveur d'acteur, et configuré pour utiliser l'injecteur basé sur des fichiers de données.

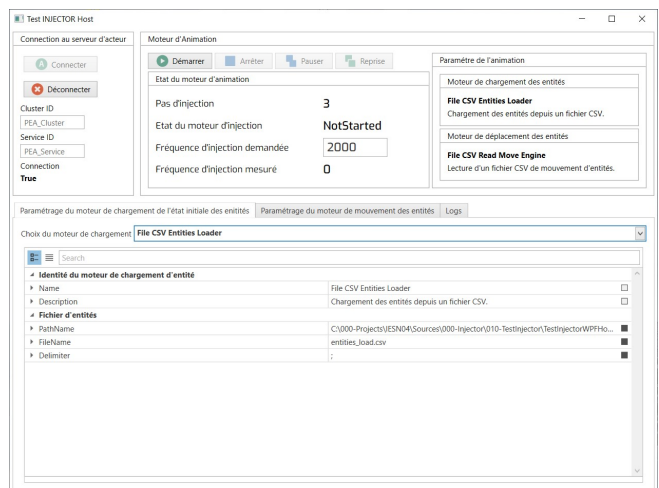


Fig. 8. Injecteurs

## 3) Gestionnaire de la survivabilité et affichage graphique

Le calcul de la survivabilité se base sur la mesure des effets pour en déduire la survivabilité. L'algorithme de mesure de la survivabilité peut être implémenté de multiples

façons, selon le système de systèmes considéré, il sera donc réalisé par délégation, ceci de manière à pouvoir changer le mode de calcul sans avoir à modifier l'acteur lui-même.

Trois modes de fonctionnement possibles sont prévus pour le déclenchement du calcul :

A/ soit par déclenchement sur Timer dont la fréquence peut être définie.

B/ soit un déclenchement par événement, par exemple la mise à jour de la position d'une entité pourrait être une cause.

C/ soit un déclenchement a posteriori, une fois que l'ensemble des mesures des effets est réalisé, donc lorsque la simulation est terminée. L'avantage de cette approche est qu'on dispose de temps pour effectuer les calculs, et de l'ensemble des informations capturées pendant la simulation source.

Il est envisageable d'utiliser les modes A « timer » et B « sur événement » en même temps.

Dans le cadre du PEA, il a été choisi d'implémenter la mesure de survivabilité basée sur la mesure des effets de type destruction lors de la présence d'une entité dans la zone de tir d'une entité ennemie. Ceci permet de tester un cas extrêmement simple pour vérifier la faisabilité du module de survivabilité et la définition de l'architecture.

La capture d'écran en Fig.9 présente l'application d'affichage des données de survivabilité.

- La fenêtre de gauche montre la liste de recherche et d'affichage des effecteurs
- La fenêtre de droite monte la représentation cartographique des entités, de leurs effecteurs

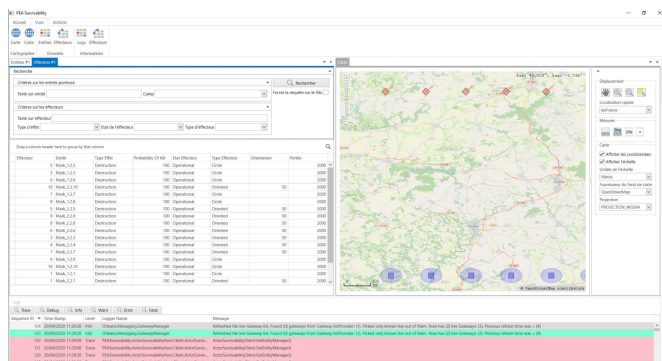


Fig. 9. - La fenêtre en bas affiche les logs de l'application. Application d'affichage des résultats de survivabilité

Le zoom sur la partie cartographique en Fig.10 permet de visualiser les entités ennemies (losange en rouge), munies d'un canon, représenté par un cône de tir.

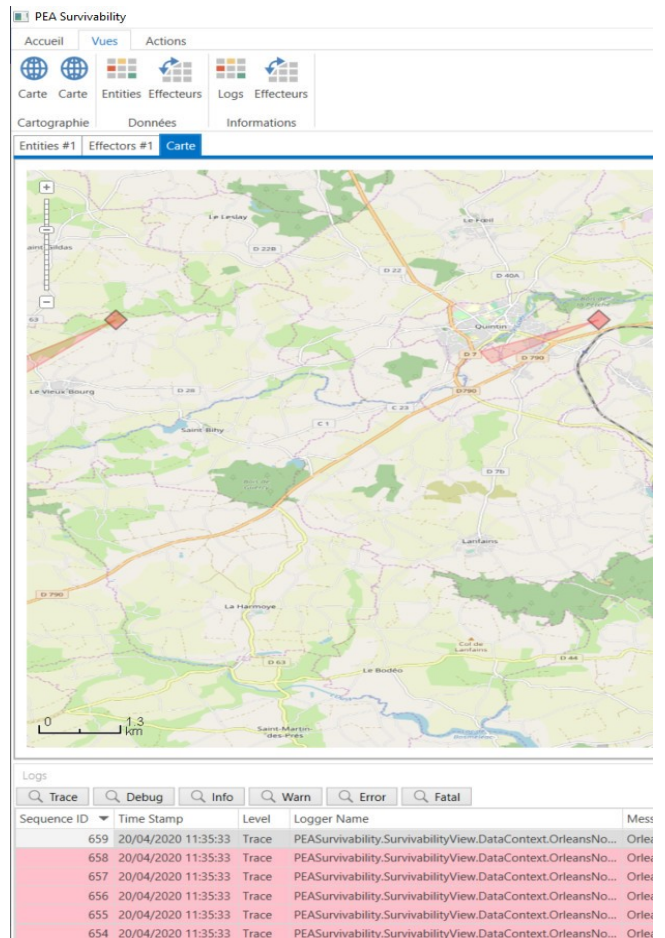


Fig. 10. Zoom affichage graphique des ennemis

### III. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'approche proposée est une solution économique : on ne crée pas de a à z une simulation dédiée uniquement à l'analyse et l'étude de la survivabilité d'un SdS, mais on utilise les simulations déjà existantes du SdS, avec un scénario représentatif, déjà discuté avec les équipes de programmes, voire même déjà utilisés en entraînement par les forces armées françaises, pour ensuite lui ajouter une surcouche d'analyse utile à la survivabilité. Par ailleurs, l'architecture par briques de base réutilisables permet de répondre plus rapidement au besoin : les analyses de survivabilité par simulation ne nécessiteront pas un codage coûteux en temps, mais une adaptation suivant le SdS étudié. Enfin, les résultats se veulent visuels et extrêmement simples à comprendre, pour discuter facilement avec les équipes programmes et faire comprendre les résultats d'études et d'analyse non triviales.

A l'heure de rédaction du document, La partie M4 « Application concrète de supervision de simulation simple, avec données générées par l'application concrète de supervision » et M5 « Application et exploitation de simulation complexe supervisée grâce à un couplage avec un CGF » est encore en développement. Son utilisation sur un cas système de système terrestre à une centaine d'entités est prévue, avec un cas très simple de survivabilité de type « destruction lors de la présence d'une entité dans la zone de tir d'une entité ennemie » et permettra de valider entièrement le développement de la simulation de survivabilité avec la validation de performance temps réel.

La suite de ce PEA consistera ensuite à développer des échelles de survivabilité de p systèmes contre n systèmes plus complexes. La transition numérique des systèmes militaires est déjà débutée et sera encore amplifiée. Demain sera fait de combat collaboratif qui fera fonctionner différentes plate-formes en réseau et en temps réel, que ce soit dans le domaine terrestre (programme Scorpion, avec une recherche de supériorité opérationnelle sur l'adversaire par le partage immédiat de l'information et l'accélération de l'action au combat entre engins blindés, chars, ou soldats interconnectés) que dans le domaine aéronautique (programme international SCAF, avec l'avion de chasse du futur, connecté à des drones ou d'autres chasseurs). L'enjeu de maîtriser ces systèmes de systèmes tant d'un point de vue opérationnel que sécuritaire est de taille. Les analyses de survivabilité au niveau système de systèmes en sont une composante essentielle. La simulation numérique permettant d'analyser un grand nombre de scénarios avec de multiples acteurs apparaît un outil prometteur dans ce domaine.

### REMERCIEMENTS

A mon prédécesseur Michaël Blaublomme pour la réalisation du cas d'expérimentation duel avec menace, à Fred Berton et Hélène François (Cag Gemini) pour l'implémentation du PEA, à toute l'équipe technique de simulation de ma division qui me soutient dans la réalisation du PEA, ainsi qu'à Jean Marchal et Gilbert Durand pour leurs soutiens et relectures.

### RÉFÉRENCES

- [1] Guide S-CAT n°10032 : "Guide de prise en compte de la survivabilité des systèmes de systèmes (SDS)". DGA, 2008 (*non publié*)
- [2] G. Durand, F. Lagorce, V. Desroches "Maîtrise de la survivabilité d'un système de systèmes", Congrès lambda mu 2012 Tours