



HAL
open science

Projet MIRAS : Robot d'assistance à la déambulation avec interaction multimodale

Viviane Pasqui, Ludovic Saint-Bauzel, Cong Zong, Xavier Clady, Philippe Decq, François Piette, Valérie Michel-Pellegrino, Amine El Helou, Michael Carré, Audrey Durand, et al.

► **To cite this version:**

Viviane Pasqui, Ludovic Saint-Bauzel, Cong Zong, Xavier Clady, Philippe Decq, et al.. Projet MIRAS : Robot d'assistance à la déambulation avec interaction multimodale. *Innovation and Research in BioMedical engineering*, 2012, 33 (2), pp.165-172. hal-01282234

HAL Id: hal-01282234

<https://hal.science/hal-01282234v1>

Submitted on 4 Mar 2016

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.

Projet MIRAS :

Robot d'assistance à la déambulation avec interaction multimodale

- *Multimodal Interactive Robot for Assistance in Strolling* -

Viviane Pasqui, ISIR, Paris, pasqui@isir.upmc.fr

Ludovic Saint-Bauzel, ISIR, Paris, saintbauzel@robot.jussieu.fr

Cong Zong, ISIR, Paris, zong@isir.fr

Xavier Clady, ISIR, Paris, xavier.clady@isir.fr

Philippe Decq, AP-HP Henri Mondor, Créteil, philippe.decq@hmn.aphp.fr

François Piette, AP-HP Charles Foix, Ivry-Sur-Seine, francois.piette@cfx.aphp.fr

Valérie Michel-Pellegrino, AP-HP Charles-Foix et Médialis, Ivry-Sur-Seine, valerie.michel@cfx.aphp.fr

Amine El Helou, AP-HP Henri Mondor, Créteil, amine.elhelou@gmail.com

Michael Carré, Médialis, Paris, mcarre@medialis.info

Audrey Durand, Médialis, Paris, adurand@medialis.info

Quynh Anh Do Hoang, LAAS-CNRS et Université de Toulouse, Toulouse, qdohoang@laas.fr

Jérémie Guiochet, LAAS-CNRS et Université de Toulouse, Toulouse, jeremie.guiochet@laas.fr

Pierre Rumeau, CHU de Toulouse, Toulouse, rumeau.p@chu-toulouse.fr

Vincent Dupourque, Robosoft, Bidart, vincent.dupourque@robosoft.fr

Julie Caquas, Robosoft, Meylan, julie.caquas@robosoft.fr

REMERCIEMENT : Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et la Caisse Nationale de Solidarité pour l'Autonomie (CNSA) au travers du programme TecSan (projet MIRAS n°ANR-08-TECS-009)

Résumé : L'objet de cet article est de présenter le projet MIRAS: Robot avec interaction multimodale pour l'assistance à la déambulation. Les objectifs de ce projet sont exposés dans un premier temps ; puis chaque axe de travail est détaillé : description des scénarii et fonctions multimodales associées, présentation du travail de conception et de réalisation du robot, synthèse de l'étude de sécurité et enfin présentation des travaux menés pour la validation clinique. Les résultats des premiers essais pilotes sont également analysés pour souligner les points d'amélioration. Enfin, une discussion sur l'intérêt de l'étude et ses problématiques est menée avant de conclure l'article.

Multimodal interactive robot for assistance in strolling

Abstract : This paper aims to present the MIRAS project : a multimodal interactive robot developed to provide assistance in strolling for people suffering from locomotion troubles. The first part of this paper summarizes goals and expected impacts of the project. Each work package is then detailed: description of use-cases and associated multimodal functions, conception and realization of the robot, security analysis and clinical validation. First results of user tests are analyzed to focus on users and developers feedback. Before concluding the paper, a short discussion about interests and problematic of the study is exposed.

Mots-clé : assistance à la verticalisation, déambulateur robotisé, interaction multimodale, sécurité, validation clinique.

Keywords: assistance in getting-up/sitting, clinical validation, multimodal interaction, robotized rollator, safety.

Conflit d'intérêt: aucun.

1. Objectifs

L'objectif du déambulateur robotisé présenté dans cet article est de proposer une assistance à la déambulation et au passage assis/debout pour des personnes atteintes de troubles de la marche et de l'équilibre. Pour remplir son rôle, le robot doit pouvoir réagir à plusieurs types de situation. Il doit être capable de comprendre un mouvement volontaire de l'utilisateur pour le suivre et l'aider dans son action, tout comme il doit réagir à un mouvement perturbateur pour corriger la posture de l'utilisateur. Enfin, le robot doit être capable de détecter les situations anormales telles que des chutes. Cette interaction entre le robot et

l'utilisateur est dite multimodale : elle est permise par l'analyse conjointe de plusieurs types de capteurs. La réalisation de ces objectifs est centrée sur trois critères essentiels : l'ergonomie, la sécurité et l'intuitivité de l'utilisation. Pour atteindre ces objectifs, les travaux ont été orientés selon plusieurs thématiques présentées dans les paragraphes suivants : la définition des scénarii et des fonctions multimodales associées, la réalisation du déambulateur robotisé, l'analyse de sécurité du produit et enfin la validation clinique du dispositif. Les retombées attendues sont nombreuses : meilleure connaissance de l'interaction robot-patient-soignant, faisabilité d'utilisation, d'ergonomie et de sécurité d'un tel dispositif et conduite d'essais cliniques avec des patients.

2. Scénarii d'usage et fonctions multimodales

Une enquête préliminaire a été réalisée auprès d'un certain nombre de patients d'un service de SSR (*Soins de Suite et de Réhabilitation*) utilisant un déambulateur classique. Cette étude a permis d'identifier plusieurs profils d'utilisation : utilisation du déambulateur en kinésithérapie uniquement, utilisation à des fins utilitaires (se rendre aux WC par exemple) sans plus d'exercices personnels, utilisation seul ou en présence d'un tiers pour s'exercer (en plus des fins utilitaires) et enfin utilisation pour de longs trajets. Bien que subjective (étude basée sur les ressentis du patient et du soignant), cette étude a permis d'identifier les différents motifs d'utilisation d'un déambulateur et a conforté le choix des scénarii de l'étude : « Aide au transfert fauteuil-lit », « Aller au WC », « Aller à la salle à manger », « Aller à la salle de bain » et « Déambulation dans le service ». Chaque scénario a ensuite été décomposé en plusieurs fonctions élémentaires: « Appel du robot par le patient », « Déplacement du robot en face du patient », « Transfert assis-debout du patient par le robot », « Transfert debout-assis du patient par le robot », « Déplacement du patient avec le robot »... Cette étude a donc permis d'associer à chaque fonction élémentaire un mode de commande du robot : l'ensemble de ces modes [1] est présenté ci-après.

Mode « Appel » - Le robot peut détecter qu'une personne « l'appelle » grâce à l'analyse d'images en provenance d'une caméra pan tilt zoom et se diriger jusqu'à portée de main de la personne via un module de navigation autonome.

Mode « Manœuvre » - La personne prend une poignée et place le robot en face d'elle.

Mode « Verticalisation » - Les poignées du robot se lèvent en même temps que le patient se

verticalise. L'observation de la posture de l'utilisateur est réalisée grâce à l'analyse d'images en provenance d'une caméra 3D.

Mode « Déambulation » - Lors de la déambulation, l'utilisateur guide implicitement le robot en se dirigeant vers son but. L'analyse des efforts d'interaction main/poignée permet de déterminer le mouvement que le robot doit effectuer autour de l'utilisateur pour l'assister dans sa déambulation. Un capteur de Kinect est placé au niveau des pieds de façon à rendre plus robuste l'analyse menée sur les efforts aux poignées.

Mode « Manœuvre » - Lorsque l'utilisateur est arrivé devant son but (siège ou toilette), il doit manœuvrer le robot tout en se positionnant, jusqu'à être prêt à s'asseoir. Dans ce cas, la poignée sert de « joystick ».

Mode « Déverticalisation » - Une fois positionné, l'utilisateur peut s'asseoir. Comme pour la verticalisation, la détection de l'intention de s'asseoir (à l'aide de l'analyse de la posture de l'utilisateur) déclenche le mouvement des poignées qui s'abaissent en même temps que la personne s'assied.

Mode « Détection de déséquilibre/chute » - Pendant l'utilisation du robot, ce dernier observe (au travers des données capteurs) si le patient perd l'équilibre ou chute. Dans le premier cas, le robot effectue un mouvement pour rééquilibrer la personne – **Mode « Rééquilibrage »** -, dans le deuxième cas il déclenche une alarme pour avertir l'équipe médicale.

L'ensemble de ces fonctions est réalisé grâce à l'analyse conjointe de plusieurs capteurs : caméra pan tilt zoom, caméra 3D, capteur de Kinect, capteurs d'efforts... Il est à noter que dans ce cadre, une étude [2] a été réalisée afin d'évaluer les performances de la Kinect, son coût étant nettement inférieur à celui d'une caméra 3D classique et ses performances suffisantes pour le projet. La conclusion de ce travail va permettre de remplacer la caméra 3D pour l'observation de la posture de l'utilisateur.

3. Réalisation du déambulateur robotisé

Un premier déambulateur (Figure 2) avait été fabriqué en début de projet sur la base d'un robot existant de la gamme Robosoft (robuLab10).

Mais cette adaptation s'est avérée inadaptée au milieu hospitalier et a permis de soulever un certain nombre de contraintes fortes en termes de dimensions, maniabilité... Une analyse a donc été menée afin de dégager les contraintes de conception, en prenant en compte les données

issues de déambulateurs classiques, des données anthropométriques, et des données sur l'accessibilité et la manœuvrabilité au quotidien. Les contraintes principales soulevées par cette analyse sont présentées ci-après.

Poignées - La hauteur minimale des poignées doit respecter la hauteur des accoudoirs d'un fauteuil, soit environ 50 cm. De cette façon, le sujet prend appui sur les poignées comme il le ferait avec un fauteuil classique et ne se laisse pas tirer par le robot. La transition assis-débout est beaucoup plus naturelle et efficace. En position verticale haute, la hauteur des poignées dépend bien entendu de la taille des patients, nous avons choisi la valeur haute relevée pour les déambulateurs conventionnels : 95 cm.

Largeur du robot – La largeur du robot doit impérativement être inférieure à 90 cm, référence indiquée par la norme concernant les fauteuils roulants.

Cinématique – Notre choix s'est porté sur deux roues motrices et directionnelles à l'avant du déambulateur et deux roues folles à l'arrière pour un maximum de manœuvrabilité.

Vérins assurant la verticalisation des bras - Nous avons identifié des contraintes de dimensionnement en terme de charge (1000 N par vérin) et en terme de temps de verticalisation/déverticalisation : pour des personnes âgées entre 1 et 2 secondes.

Vitesse de la plateforme - La vitesse moyenne de marche est estimée à 4.8 km/h; ce qui correspond à 1.3 m/s. La vitesse moyenne du moteur assurant la traction ainsi que le rapport réducteur devront donc être choisis pour respecter cette valeur (a priori les utilisateurs auront une vitesse de marche inférieure à la moyenne).

Energie – L'étude préliminaire menée auprès de patients a permis d'estimer le temps d'utilisation maximum d'un déambulateur à 2h30 par jour environ. L'énergie du robot doit donc être gérée pour assurer ce temps de fonctionnement.

Un deuxième prototype prenant en compte cette analyse est en cours de réalisation et de validation (Figure 3). Les modes de commande permettant le fonctionnement basique du robot sont déjà implémentés et ont déjà été testés sur des sujets volontaires ; les résultats de ces tests sont présentés §6.

4. Sécurité du système

L'approche utilisée pour conduire l'analyse de sécurité est une approche centrée utilisateur et basée sur la gestion du risque intégrant l'aspect

pluridisciplinaire d'un système robotisé (mécanique, électronique, informatique, humain). Ce processus est incrémental et itératif, et a été réalisé en parallèle avec le processus de conception. Cette approche se base sur le processus classique que l'on retrouve dans les normes sur la gestion du risque [4], notamment la norme du domaine médical ISO/FDIS 14971:2006 [6] qui s'adapte à la sécurité de la robotique de service [5]. Pour cela nous avons choisi et adapté des techniques de modélisation et d'analyse présentée Figure 6. La première étape consiste à modéliser le système et les scénarii d'utilisation en utilisant la notation UML (*Unified Modeling Language*). Ces modèles sont par la suite analysés grâce à une adaptation de la technique d'analyse du risque HAZOP (*Hazard Operability* [3]). Cette approche, présentée en détail dans [7, 10, 8], permet d'identifier de manière systématique les dangers grâce à des listes de mots-guides. Cette liste de dangers est ensuite utilisée pour construire un *safety case* (parfois traduit par Cas de sûreté), modélisé grâce à la notation GSN (*Goal Structuring Notation* [9]). Cette méthode permet de structurer l'argumentation du traitement des risques, et donc de justifier de l'acceptabilité ou non des risques résiduels.

Identification des dangers avec HAZOP-UML

Cette étude, basée sur une analyse HAZOP des modèles UML haut niveau du déambulateur, a fait ressortir 16 classes de dangers et nous a permis d'établir de nombreuses recommandations de sécurité et de niveaux d'intégrité de fonctions de sécurité. Cette analyse a été réalisée sur trois itérations, et notamment sur 2 versions de prototypes du robot. Le tableau I donne la liste finale des classes des dangers du déambulateur.

Identification des niveaux pour estimation et évaluation du risque

Pour chaque danger, il est ensuite nécessaire de fixer un niveau de gravité du dommage pouvant être induit, ainsi que de sa probabilité d'occurrence. Ces niveaux permettent par la suite de fixer pour chaque couple gravité/probabilité, si le risque est acceptable ou non. Il n'existe pas de niveaux génériques et normés, ainsi pour chaque projet, et notamment les innovations, il convient de fixer ces niveaux. Nous les avons fixés en partant de niveaux issus du domaine médical, et en collaborant avec les 3 hôpitaux partenaires de MIRAS. Nous avons obtenu 5 niveaux de gravité : **Catastrophique** (*Entraîne le décès du patient*), **Critique** (*Entraîne une déficience permanente ou une blessure mettant en danger la vie du patient*), **Important** (*Entraîne*

une blessure (a) avec l'intervention de professionnels de la santé ou (b) entraînant une perte de confiance envers le système de la part du patient), **Mineur** (*Entraîne une blessure temporaire (a) sans l'intervention de professionnels de la santé ou (b) entraînant une perte de confiance envers le système de la part du personnel médical*), **Négligeable** (*Nuisance ou gêne temporaire*). Ensuite, en se basant sur une utilisation de base de 2h par semaine, 7j/7, nous avons fixé comme niveaux de fréquence d'un événement non désirable 7 valeurs, de **Très fréquent** (*~ 1 fois/ semaine*) à **Improbable** (*inférieur à 1 fois/ 100 ans*). Finalement, trois niveaux d'acceptabilité ont été proposés aux partenaires : **Non Acceptable** (*le bénéfice lié à l'utilisation ne peut justifier le risque encouru*), **Tolérable** (*les coûts financiers, humains, organisationnels, ou techniques, ne permettent pas de réduire le risque, mais au regard du bénéfice apporté, il est toléré*), **Acceptable** (*le niveau de risque ne requiert aucune réduction supplémentaire*).

La matrice de risque Figure 1 présente le résultat de ce travail, définissant pour chaque danger son niveau de gravité considéré, et les fréquences d'occurrence pour lesquelles le risque est acceptable, tolérable ou non acceptable. Cette matrice sert ensuite de référence pour tous les calculs ou les argumentations construites par la suite.

Argumentation d'acceptabilité

En se basant sur la matrice de risque précédente, il a été relativement simple de démontrer que le prototype utilisé pour les premiers tests ne présentait pas de risques inacceptables. En revanche, l'évaluation du risque pour une version finale du robot est plus complexe. En effet, sans les moyens de protection et de réaction qu'offre la présence de personnel médical et technique, il faut évaluer précisément les fréquences d'occurrence pour décider de l'acceptabilité d'un risque. Cependant cela n'est pas possible du fait d'éléments encore non implémentés, ainsi que de l'impossibilité d'obtenir certains taux de défaillance. Pour cela, la notion de *safety case*, supportée par la notation GSN, nous a permis de construire un argumentaire qui spécifie l'ensemble des preuves, et des solutions permettant de réduire les risques identifiés dans MIRAS.

Le système développé dans MIRAS doit permettre de se substituer à un déambulateur classique, nous avons donc construit un argumentaire autour de l'objectif suivant : « Le robot est au moins aussi sûr qu'un déambulateur classique ». Deux stratégies

présentées Figure 7 ont été développées. La première consiste à traiter les risques qu'on peut également trouver avec un déambulateur classique, la deuxième traite à son tour les risques qui sont propres au déambulateur robotisé développé dans le cadre de MIRAS. Le résultat de cette étude est la production d'une liste structurée de preuves (tests, arbre de fautes, application de norme, etc.) qui malgré la complexité du système (notamment son hétérogénéité), et la présence d'incertitudes, permet de placer une confiance justifiée dans la sécurité du système.

5. Validation clinique

Analyse biomécanique de l'équilibre chez des patients appareillés

Une étude bibliographique concernant l'équilibre dynamique de l'ensemble patient-déambulateur a tout d'abord permis d'extraire les indicateurs d'équilibres du système en mouvement les plus cités [11]. Ensuite, une analyse quantifiée de l'équilibre (position debout) et de la marche avec déambulateur a été réalisée chez des patients âgés utilisateurs.

A l'aide d'un système optoélectronique (Motion Analysis) et de plateformes de forces (Berotec), un ensemble de paramètres caractérisant la marche et l'équilibre du patient sur son déambulateur ont été calculés :

- **Paramètres spatio-temporels de la marche** englobant la vitesse de marche et les largeur/longueur de pas avec leurs variations.
- **Cinématique articulaire** décrivant la variation des angles articulaires (membres inférieurs et supérieurs) dans les 3 plans de l'espace lors de la marche.
- **Distance entre le centre de gravité du patient et la base du déambulateur** : cette distance (ainsi que sa variation durant la marche) a permis de mieux quantifier le positionnement adopté du patient par rapport au déambulateur. Ce paramètre peut également être considéré comme un indicateur d'équilibre du sujet sur son déambulateur.

Tous ces paramètres ont permis par la suite de contribuer à la conception du robot, ils permettront également d'initialiser et valider a posteriori la cinématique du patient, estimée par le robot.

Protocole clinique de faisabilité d'utilisation du déambulateur robotisé

Les objectifs de l'étude clinique sont : i) tester la faisabilité d'utilisation du robot déambulateur par les patients âgés ii) réaliser une évaluation

ergonomique de la technologie.

Pour évaluer la faisabilité d'utilisation du robot, un protocole clinique a été réalisé. Celui-ci a été accepté en décembre 2011 par le Comité de Protection des Personnes (CPP) et l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSAPS). Il sera mis en œuvre sur 3 sites hospitaliers (AP-HP Charles Foix, AP-HP Henri Mondor et CHU Toulouse) dès mars 2012.

Les patients participant à l'étude seront considérés avec respect de leur personne, parole, image, intimité. Un formulaire de recueil de consentement et une lettre d'informations seront signés par le patient pour valider sa participation. Le traitement informatique, en conformité avec la loi 78-17 du 6 janvier 1978, autorisera un droit d'accès et de rectification des données aux patients. 30 patients sélectionnés selon les critères présentés ci-après seront évalués sur l'ensemble des 3 sites hospitaliers.

L'étude rétrospective sur une population de patients admis en SSR [12], présentée au §2, a permis, outre une meilleure caractérisation du profil des patients utilisateurs d'aides à la déambulation, de contribuer à l'élaboration des critères d'inclusion ci-dessous :

- Patient en perte d'autonomie ayant subi un alitement de 2 jours minimum suite à une chirurgie orthopédique du membre inférieur (donc appui autorisé) ou décompensation cardio-vasculaire / respiratoire ;
- Patient qui utilise un déambulateur classique depuis 5 jours minimum ;
- Etat cardiovasculaire stabilisé ;
- Absence de douleur ressentie aux articulations ;
- Capacité cognitive suffisante pour la compréhension et signature du formulaire de recueil de consentement et la compréhension de la consigne expérimentale ;
- Bonne acuité visuelle ;
- Capacité à se lever et effectuer quelque pas seul (ou en présence d'un tiers).

Lors de la séance d'évaluation, les patients devront réaliser une série de tâches usuelles qui sont : « *Se lever et Marcher* », « *Marcher et S'asseoir* », « *Passage de porte avec poussée* », « *Passage de porte avec traction* », « *Test d'endurance* ». Les tâches seront interrompues par des phases de repos; les évaluations seront réalisées dans une salle de l'hôpital sous la surveillance d'un professionnel de santé.

Les indicateurs de performance des tâches motrices et de fonctionnement de base du robot ainsi que les stratégies d'utilisation du déambulateur robotisé seront recueillis par l'observateur au cours de la

séance via des grilles de notation conçues pour une prise d'informations rapide.

6. Résultats

Le protocole expérimental mis en place pour les premiers essais menés au CHU de Toulouse avec des personnes âgées est une séquence de trois tests : deux tests normalisés et chronométrés – le « 4 mètres lancés » et le « Get-up and Go » - et un troisième test, dit écologique, mis au point spécifiquement pour évaluer les fonctionnalités du robot (Figure 4). Ces premiers tests menés avec des personnes âgées (Figure 5) ont surtout permis de montrer les dysfonctionnements du prototype, dysfonctionnements dus essentiellement à la commande (la vitesse d'avance du robot n'est pas suffisante), les asservissements des moteurs (la stabilité de la commande en direction est insuffisante), et le contrôleur (la robustesse de la commande dans le déclenchement de la verticalisation est insuffisante). L'amélioration de ces trois points doit conduire à un fonctionnement normal du robot et assister les personnes à la transition assis-debout et à la déambulation. Les fonctions multimodales seront alors transférées et testées.

7. Conclusion

Une aide à la déambulation peut permettre une meilleure autonomie aux personnes âgées, diminuer leur dépendance, compenser leur handicap et d'une manière générale améliorer leur qualité de vie. Au-delà de cet objectif, peu d'études sur le sujet ont été réalisées et il existe donc peu de données cliniques sur l'interaction robot-patient-soignant. Cette étude, en plus de la faisabilité technique et d'utilisation d'un tel robot, permet d'enrichir la base de connaissances de ce domaine. Les points durs de cette étude concernent d'une part la réalisation technique du prototype de déambulateur robotisé, de son contrôleur et des asservissements moteurs et d'autre part le peu de données cliniques disponibles sur le sujet (à la fois pour l'analyse de risques et pour l'ergonomie d'un tel dispositif).

8. Références bibliographiques

[1] Panaité J, Usciati T, Clady X, Haliyo S. « An experimental study of the Kinect's depth sensor ». In IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environment; 2011 Sep ; Montréal, Canada.
[2] Pasqui V. « Une aide technique robotisée pour la mobilité pour personnes âgées handicapées ».

SFTAG'09 ; conférence invitée ; 2009 Nov, Troyes, France.

[3] IEC 61882. « Hazard and Operability Studies (Hazop Studies) – Application Guide. » International Electrotechnical Commission ; 2001.
[4] ISO/CEI Guide 51. Aspects liés à la sécurité - Principes directeurs pour les inclure dans les normes. International Organization for Standardization, 1999.
[5] Guiochet J, Motet G, Tondu B, Baron C. « Sécurité Des Systèmes De La Robotique Médicale. » Techniques de l'ingénieur SE2, no. Sécurité et gestion des risques (2007): 1-16.
[6] ISO 14971. Dispositifs médicaux - Application de la gestion des risques aux dispositifs médicaux. International Organization for Standardization, 2000.
[7] Guiochet G, Martin-Guillerez D, Powell D. « Experience with a model-based user-centered risk assessment for service robots ». In 12th IEEE International High Assurance Systems Engineering Symposium ; 2010 Nov ; San Jose, CA, USA.
[8] Do Hoang Q.A, Guiochet J, Kaaniche M, Powell D. « Human-robot interactions: model-based risk analysis and safety case construction ». In Embedded Real Time Software and Systems (ERTS) ; Feb 2012 ; Toulouse, France.
[9] Kelly T.P. « Arguing Safety - A Systematic Approach to Managing Safety Cases » ; PhD ; University of York, USA ; 1998.
[10] Martin-Guillerez D, Guiochet J, Powell D. « A UML-based method for risk analysis of human-robot interaction ». In 2nd International Workshop on Software Engineering for Resilient Systems (SERENE'10) ; Apr 2010 ; London, United Kingdom ; p 32– 41.
[11] Michel V, El Helou A, Piette F. « Synthèse de la revue de littérature sur les technologies d'assistance à la locomotion : approche biomécanique de l'analyse de l'équilibre ». Congrès ASSISTH ; Dec 2010 ; Paris, France.
[12] El Helou A, Gracies JM, Decq P, Skalli W. « Estimating foot inertial parameters: A new regression approach ». Clin Biomech (Bristol, Avon). 2011 Oct 26.

9. Tableaux

Tableau I: Liste des dangers (identifiant « HN... » et description)

HN01	Posture incorrecte du patient pendant l'utilisation du robot.
HN02	Chute du patient pendant l'utilisation du robot (comme pour un déambulateur classique).
HN03	Arrêt total du robot pendant l'utilisation (absence d'énergie).
HN04	Chute du patient sans alarme ou avec alarme tardive.
HN05	Problème physiologique du patient sans alarme ou avec alarme tardive.
HN06	Chute du patient provoquée par le robot (mouvement non désiré du robot).
HN07	Incident détecté mais défaut de passage en mode sûr ; le robot continue à se déplacer.
HN08	Le robot coince un membre du patient (entre 2 parties du robot ou entre le robot et un objet fixe).
HN09	Collision entre le robot (ou partie du robot) et le patient.
HN10	Collision entre le robot et une personne autre que le patient.
HN11	Gêne du personnel médical pendant une intervention.
HN12	Déséquilibre du patient provoqué par le robot (sans chute).
HN13	Fatigue du patient due à une mauvaise ergonomie ou commande du robot (sans chute).
HN15	Chute du patient depuis le siège du robot.
HN16	Alarme trop fréquente (Fausse Alarme).



Figure 2: Premier prototype (base robuLab10 de Robosoft)

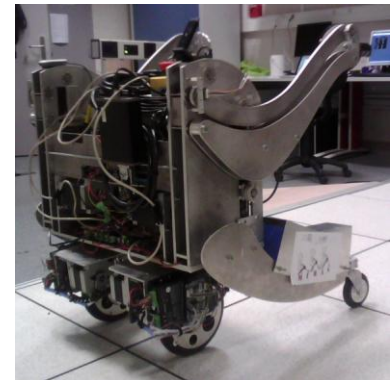


Figure 3: Prototype en cours de validation réalisé par l'ISIR

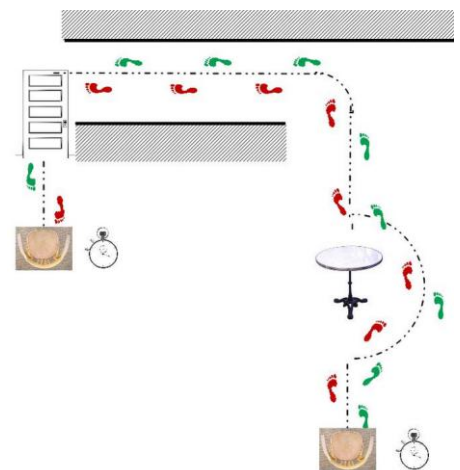


Figure 4: Test « écologique »

10. Figures

Catastrophique	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6
	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15
	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4
Critique	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5
	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3
	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8
	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10
Important	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7
	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9
	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12
	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13
Mineur	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16
	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1
Négligeable	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11
Gravité / Fréquence	Improbable	Rare	Peu probable	Peu fréquent	Moy. fréquent	Fréquent	Très fréquent
	>100 ans	/100 ans	/10 ans	/an	/6 mois	/mois	/semaine
	Acceptable		Tolérable			Non acceptable	

Figure 1: Matrice de risques

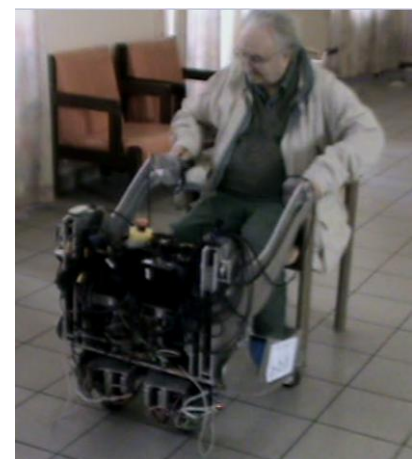


Figure 5: Tests « pilotes »

Modèles UML

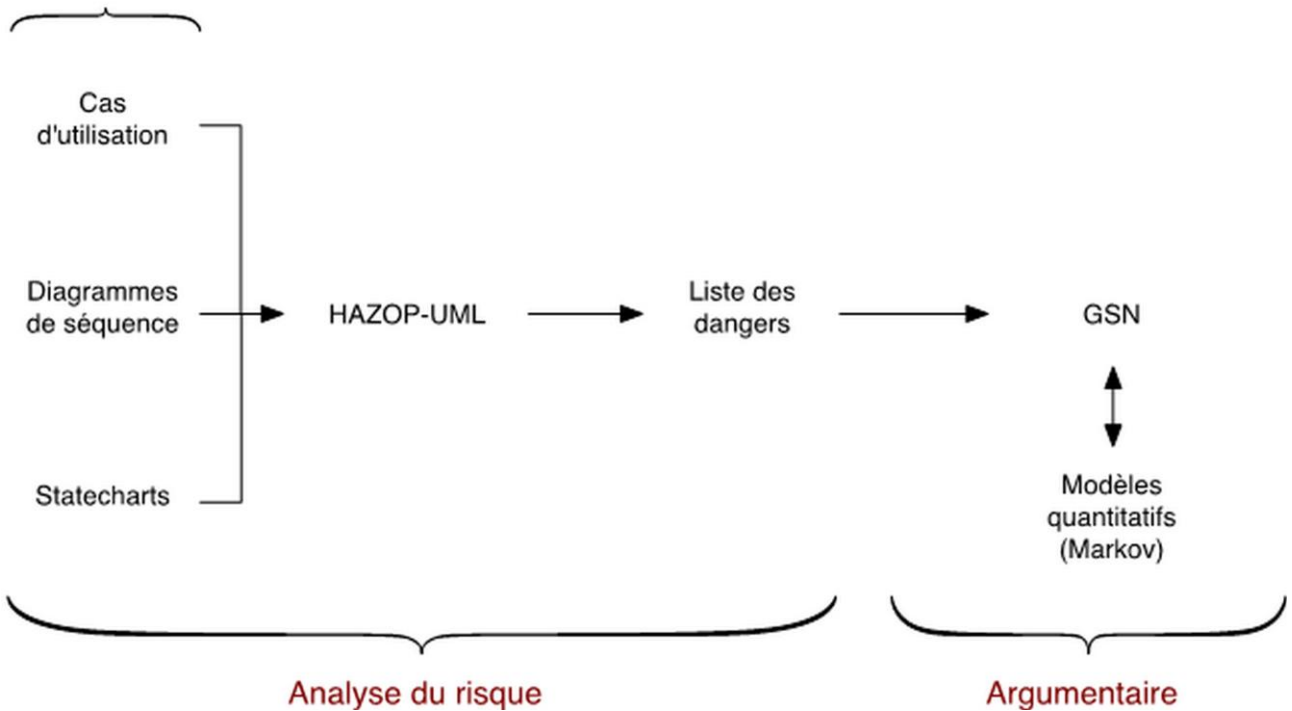


Figure 6: Modèles et techniques utilisés pour l'analyse de la sécurité

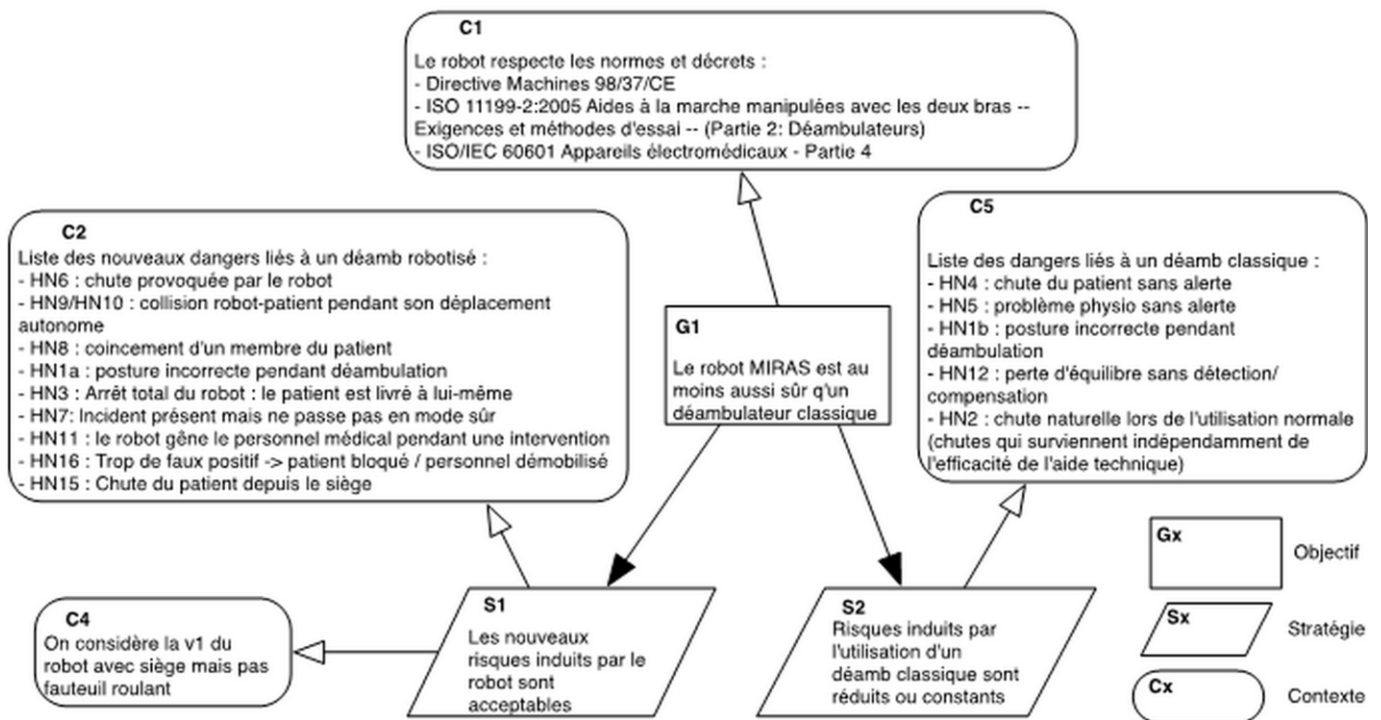


Figure 7: Objectifs de haut niveau de l'analyse GSN de MIRAS

Figure 1
[Click here to download high resolution image](#)

Catastro- phique	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6	HN6
	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15	HN15
	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4	HN4
Critique	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5	HN5
	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3	HN3
	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8	HN8
	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10	HN10
Important	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7	HN7
	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9	HN9
	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12	HN12
	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13	HN13
	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16	HN16
Mineur	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1	HN1
	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11	HN11
Négligeable							
Gravité Fréquence	Impro- bable	Rare	Peu probable	Peu fréquent	Moy. fréquent	Fréquent	Très fréquent
	>100 ans	/100 ans	/10 ans	/an	/6 mois	/mois	/semaine
	Acceptable			Tolérable			Non acceptable

Figure 2
[Click here to download high resolution image](#)



Figure 3
[Click here to download high resolution image](#)

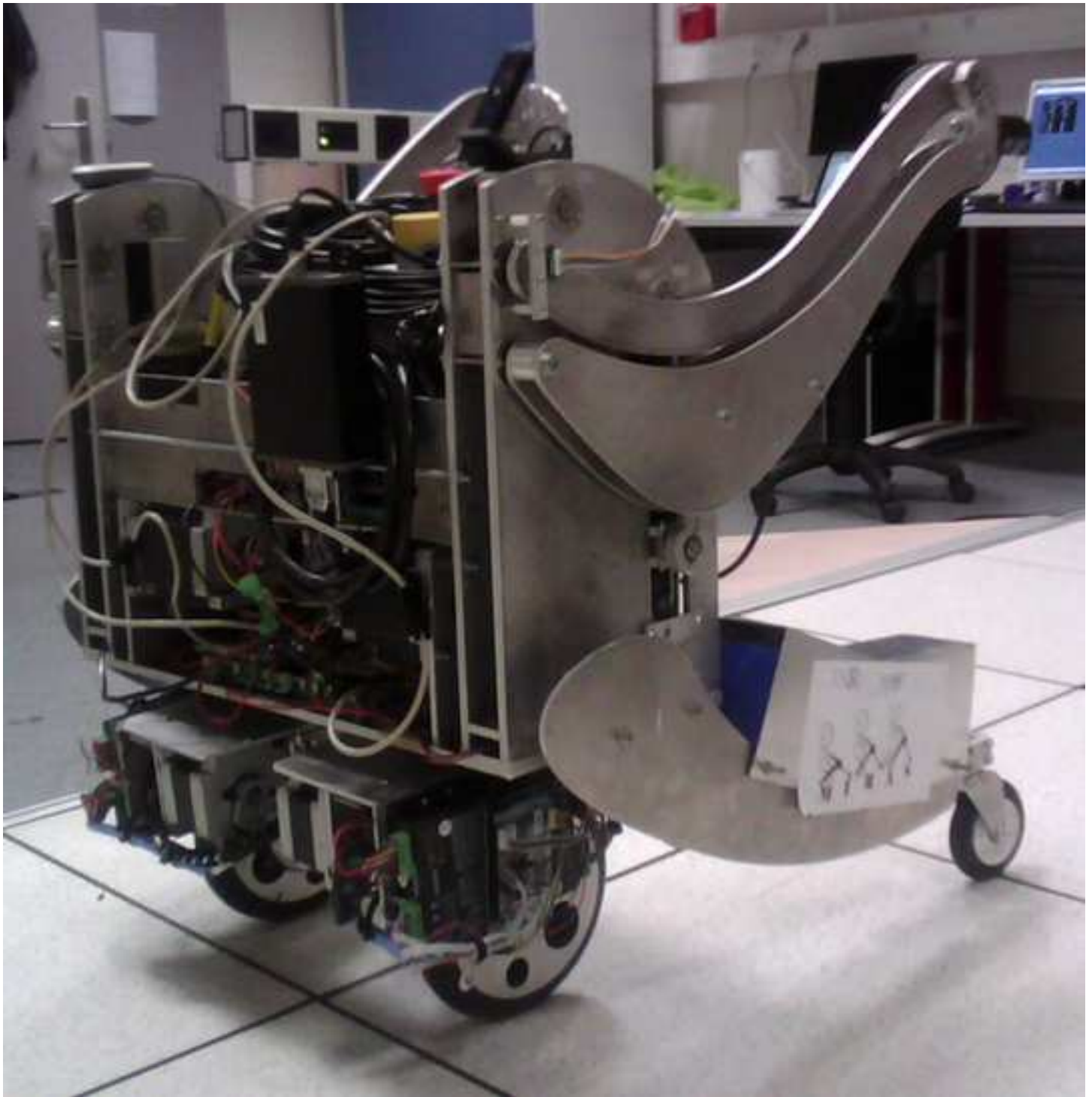


Figure 4
[Click here to download high resolution image](#)

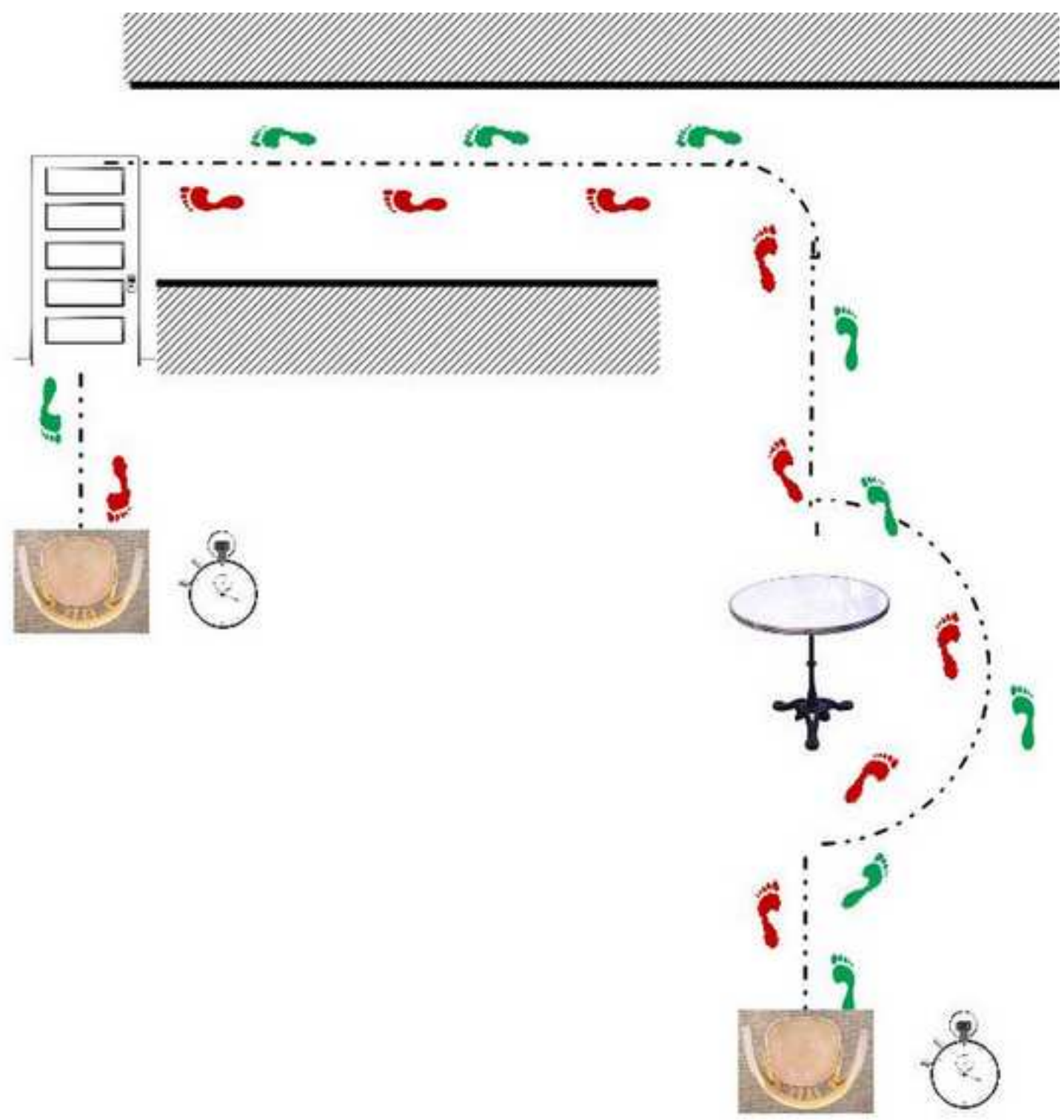


Figure 5
[Click here to download high resolution image](#)



Figure 6
[Click here to download high resolution image](#)

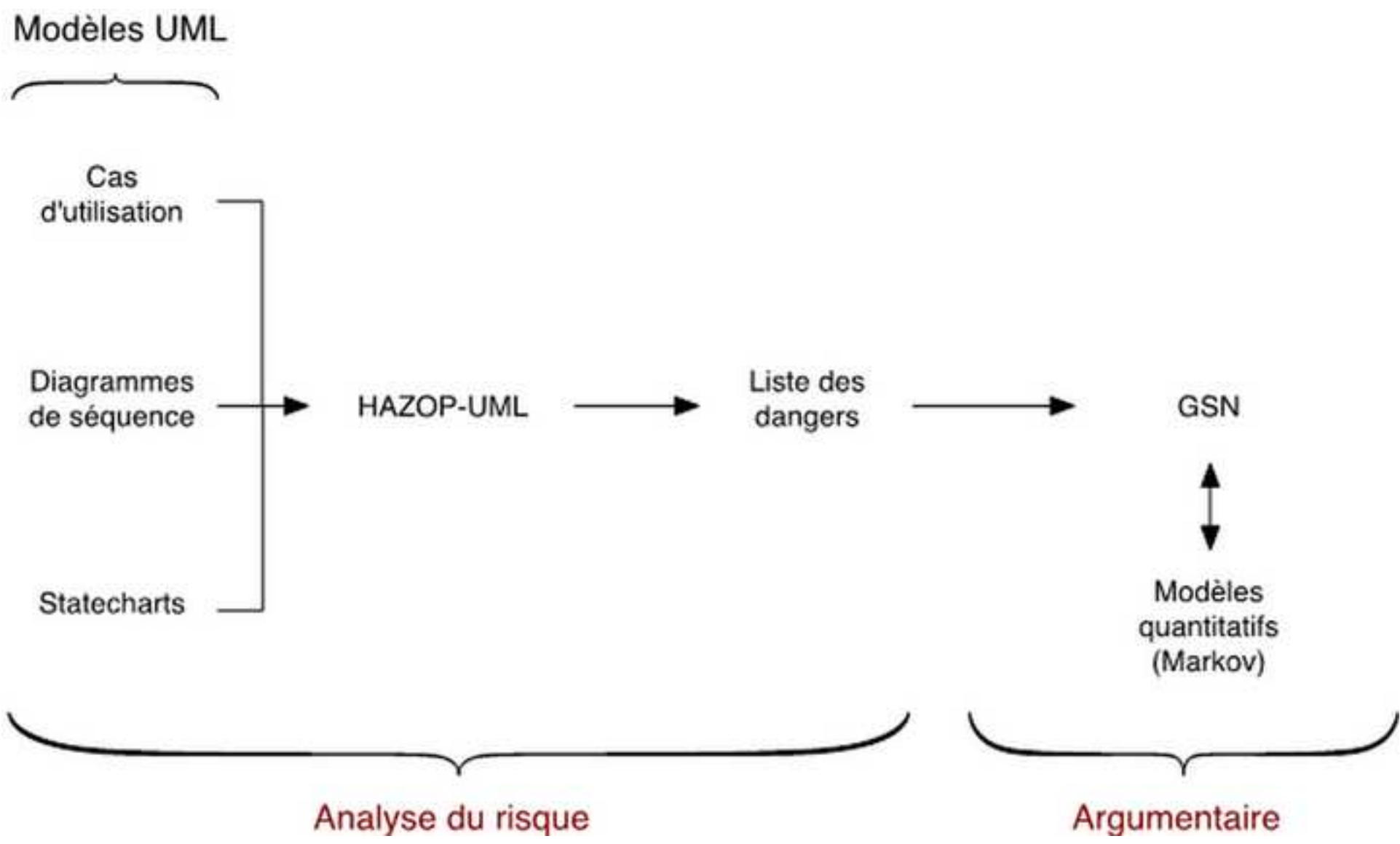


Figure 7
[Click here to download high resolution image](#)

