



HAL
open science

Sécurité ferroviaire et facteurs humains. Apport de la chronobiologie de la vigilance

Habib Hadj-Mabrouk, Abderraouf Hadj-Mabrouk, Mohamed Dogui

► To cite this version:

Habib Hadj-Mabrouk, Abderraouf Hadj-Mabrouk, Mohamed Dogui. Sécurité ferroviaire et facteurs humains. Apport de la chronobiologie de la vigilance. https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/inrets/Syntheses/Syntheses_INRETS_S38.pdf. https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/inrets/Syntheses/Syntheses_INRETS_S38.pdf, 38, pp.136, 2001, ISBN: 2-85782-558-7. hal-02397488

HAL Id: hal-02397488

<https://hal.science/hal-02397488v1>

Submitted on 17 Apr 2024

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.

Habib HADJ-MABROUK
Abderraouf HADJ-MABROUK
Mohamed DOGUI

SECURITE FERROVIAIRE ET FACTEURS HUMAINS



Apport de la chronobiologie de
la vigilance



LES COLLECTIONS DE L'INRETS

Les collections de l'INRETS

Le libre accès à l'information scientifique est essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés, l'Université Gustave Eiffel a fait le choix de numériser et de mettre à disposition en téléchargement gratuit, l'intégralité des ouvrages publiés dans les collections de l'Inrets.

La collection Recherches

La collection Recherches regroupe des ouvrages présentant un travail de recherche particulier en replaçant celui-ci dans son contexte scientifique, en détaillant la méthodologie de recherche suivie, les résultats originaux obtenus et leur exploitation et en ouvrant des perspectives à ce travail.

Cette collection s'adresse principalement aux scientifiques, ingénieurs, décideurs publics et politiques, services techniques des collectivités, industriels, associations et enseignants.

La collection Synthèses

La collection Synthèses regroupe des états de l'art dans un domaine donné, en s'appuyant sur une revue bibliographique rigoureuse avec éventuellement, un bilan de la contribution de l'institut et des autres membres de la communauté scientifique. Susceptible d'être lus par des non-spécialistes, ces ouvrages sont rédigés avec rigueur mais aussi avec un réel souci pédagogique.

La collection Outils et Méthodes

La collection Outils et Méthodes regroupe des présentations de techniques expérimentales, de méthodologies d'investigation ou d'exploitation des données, de logiciels, suffisamment génériques pour être utilisés dans différents domaines applicatifs.

Cette collection s'adresse principalement aux scientifiques, ingénieurs, services techniques des collectivités et industriels.

La collection Actes

La collection Actes regroupe des recueils de papiers ou de communications, présentés lors d'un séminaire, d'une journée spécialisée, d'un groupe de travail, ou d'un colloque. Il s'agit de textes originaux, sélectionnés par les responsables éditoriaux des Actes.

Cette collection s'adresse principalement à un public de scientifiques.

Les ouvrages des collections de l'Inrets sont diffusés sous la licence Creative Commons CC BY-NC-ND. Cette licence ne permet que la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, les documents peuvent être copiés, distribués et communiqués par tous moyens et sous tous formats.



-  Attribution — Vous devez créditer l'œuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Université Gustave Eiffel vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

-  Pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

-  Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

*Habib HADJ-MABROUK
Abderraouf HADJ-MABROUK
Mohamed DOGUI*

SECURITE FERROVIAIRE ET FACTEURS HUMAINS

***Apport de la chronobiologie de la
vigilance***

*Synthèse n° 38
Juillet 2001*

Habib HADJ-MABROUK

Docteur en automatique industrielle et humaine

Habilité à diriger des recherches

Chargé de recherche à l'INRETS-ESTAS

Abderraouf HADJ-MABROUK

Docteur en Médecine

Mohamed DOGUI

Docteur en Médecine et Professeur en physiologie

Chef du service d'explorations fonctionnelles du système nerveux

(CHU Sousse-Tunisie)

L'Unité de recherche :

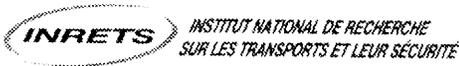
ESTAS : Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés et de leur Sécurité

20 rue Elisée Reclus, BP 317, 59666 Villeneuve d'Ascq Cedex

Référés :

Annick POTTIER chargée de recherche au Laboratoire de Psychologie de la Conduite (LPC)

Yves DAVID (ex directeur délégué à l'INRETS), consultant



N° ISBN : 285782-558-7 N° ISSN : 0769-0274

COPYRIGHT : Reproduction autorisée sous réserve d'en mentionner l'origine

PRIX : 100,00 Francs T.T.C. (T.V.A.5,5 %) - 15,24 €.

Les commandes doivent être adressées à l'INRETS - Services publications - 2, av. du Général Malleret-Joinville - 94114 ARCUEIL CEDEX, et être accompagnées d'un chèque bancaire ou postal à l'ordre de : l'Agent Comptable de l'INRETS. Déduire la TVA pour l'étranger hors Union Européenne. Pour les pays de l'Union Européenne se reporter à la réglementation intracommunautaire en matière de TVA.

Fiche bibliographique

1 UR (1er auteur) ESTAS		2 Projet n°		3 INRETS Synthèse n°38	
4 Titre SECURITE FERROVIAIRE ET FACTEURS HUMAINS					
5 Sous-titre Apport de la chronobiologie de la vigilance				6 Langue F	
7 Auteur(s) Habib Hadj-Mabrouk, Abderraouf Hadj-Mabrouk, Mohamed Dogui				8 Rattachement ext. ext. ESTAS	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur				10 N° contrat, conv.	
				11 Date de publication Juillet 2001	
12 Remarques					
13 Résumé <p>La chronobiologie a pour objet l'étude des rythmes biologiques de l'homme dont ceux de la vigilance et des performances. L'analyse des rythmes de la vigilance chez l'homme montre que des épisodes d'hypovigilance apparaissent à des horaires prévisibles de la journée. La baisse de la vigilance de l'opérateur humain est parmi les principales causes d'accidents de la route. Elle est aussi souvent à la base des accidents et incidents des transports ferroviaires. Les accidents par hypovigilance présentent un maximum de risque en milieu de l'après-midi, tard dans la nuit et tôt le matin conformément aux patterns circadiens de la somnolence.</p> <p>A notre connaissance, dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires, l'aspect chronobiologique de la vigilance n'a jamais été abordé. Pourtant, le régime de rotation des horaires du travail des opérateurs humains, dans ce domaine, pose le même problème que le travail posté. La prise en compte des données chronobiologiques peut améliorer la sécurité en proposant des solutions d'adaptation des horaires du travail aux variations circadiennes des capacités fonctionnelles de l'opérateur humain. La détermination des horaires de meilleure performance de l'opérateur humain et leur concordance avec ses horaires de travail améliorent la fiabilité du système Homme-Machine et réduisent ainsi le risque d'accident.</p> <p>Cette étude se propose de donner un aperçu sur la chronobiologie de la vigilance et des performances, d'analyser l'apport de ces notions dans la sécurité des transports routiers, et de proposer une approche méthodologique d'application des concepts liés à la chronobiologie de la vigilance en vue d'améliorer la sécurité des systèmes de transports ferroviaires guidés.</p>					
14 Mots clés Sécurité, Facteurs Humains, Transports, Chronobiologie, Vigilance, Performances, Accidents.				15 Diffusion libre	
16 Nombre de pages 138		17 Prix 100 F - 15,24 €		18 Confidentiel	
				19 Bibliographie oui	

Publication data form

1 UR (1st author) ESTAS	2 Projet n°	3 INRETS Synthesis n°38	
4 Title RAIL SAFETY AND HUMAN FACTORS			
5 Subtitle A Contribution of Alertness Chronobiologia		6 Language F	
7 Author(s) Habib Hadj-Mabrouk, Abderraouf Hadj-Mabrouk, Mohamed Dogui		8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address		10 Contract, conv. N°	
		11 Publication date July 2001	
12 Notes			
13 Summary <p>Chronobiologia studies human biological rates including alertness and performance. The analysis of human alertness rates shows that hypoalertness episodes occur at foreseeable periods in the daytime. The alertness drop of the human operator is one the the main causes of road accidents. It also often leads to rail transport incidents and accidents. The peak of accidents risk through hypoalertness has been detected in the middle of the afternoon, late at night and early in the morning, which complies with the circadian patterns of drowsiness.</p> <p>As far as we know, in the field of rail transport safety, the chronobiological aspect of alertness has not yet been addressed. However, the rotation rate of the human operators work schedules sets the same problem as shift work. To take into account the chronobiological data can improve safety, proposing solutions to adapt work schedules to the circadian changes of the human operator functional capacities. To determine the times of best performance by the human operator and to make them match his work schedules improves the reliability of the man-machine system and reduces the risk of accident.</p> <p>This study gives an overview of alertness and performance chronobiologia, an analysis of the contribution of these notions in road transport safety, and presents a methodological approach to be applied to the concepts linked with alertness chronobiologia for a better guided rail and transport systems safety.</p>			
14 Key words Safety, Human Factors, chronobiologia, alertness, sleepiness, performance, crashes		15 Distribution statement	
16 Nb of pages 138	17 Price 100 FF - 15,24 €	18 Declassification	19 Bibliography yes

Table des matières

Synthèse	15
Introduction générale	21
Chapitre 1 : Notions de chronobiologie	
Introduction	23
Caractéristiques d'un rythme biologique	23
Propriétés des rythmes biologiques	25
Signification des rythmes biologiques	26
Conclusion.....	26
Chapitre 2 : Les rythmes de la vigilance et des performances	
Introduction	27
Notions de vigilance.....	27
Relation vigilance – performance	28
Différents rythmes de la vigilance	29
Aspect Circadien.....	29
Typologie circadienne du sommeil.....	31
Aspect Ultradien	33
Aspect Circasémidién	33
Modèles d'évaluation de la vigilance	35
Méthodes d'évaluation de la vigilance	38
Facteurs altérant les rythmes de la vigilance	40
Troubles du sommeil	40
L'alcool	41
La prise médicamenteuse.....	41
L'âge	41
Autres.....	41
Conclusion.....	42

Chapitre 3 : Vigilance et accidents de la route

Introduction	43
Epidémiologie des accidents par hypovigilance du conducteur	44
Le rythme des accidents par somnolence au volant	45
Caractéristiques des accidents par hypovigilance.....	47
Causes de la somnolence au volant	48
Population à haut risque.....	52
Moyens de détection des hypovigilances et de prévention du risque d'accidents	53
Systèmes de détection des hypovigilances.....	54
Mesures de prévention des hypovigilances.....	56
Moyens comportementaux	56
Moyens instrumentaux	58
Conclusion.....	59

Chapitre 4 : Facteurs humains et sécurité des transports ferroviaires guidés

Introduction	61
Les contraintes du métier.....	61
Les causes des accidents ferroviaires.....	63
Notions d'erreur humaine	63
L'Homme a-t-il encore sa place dans les systèmes de transports automatisés ?	66
Motifs et limites de l'automatisation.....	66
Rôle de l'opérateur humain dans les transports automatisés	68
Exemples d'erreurs humaines dans les transports ferroviaires automatisés	73
Principes d'une automatisation centrée sur l'homme.....	74
Questions soulevées par l'automatisation centrée sur l'homme	75
Conclusion	76
Projet FACTHUS : Intégration des Facteurs Humains dans la sécurité ferroviaire	77
Contexte général de l'étude	78
Motivations du projet FACTHUS.....	79
Approche méthodologique d'intégration des facteurs humains dans l'analyse de la sécurité des systèmes de transports guidés	80
Conclusion.....	83

Chapitre 5 : Approche d'aide à l'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires

Introduction	85
Etude de l'existant.....	86
Limites des approches proposées.....	87
Proposition d'une approche d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires.....	88
Principe général de l'approche proposée.....	89
Recueil des données des accidents	91
Recherche des accidents dus à une erreur humaine	91
Répartition temporelle des accidents dus à une erreur humaine.....	93
Recherche d'une corrélation entre le rythme des accidents dus à une erreur humaine et les rythmes de la vigilance.....	93
Recherche des causes d'accidents relatives à une erreur humaine	93
Identification des causes d'hypovigilance à l'origine d'accidents.....	95
Elaboration des moyens de détection et de prévention des hypovigilances	96
Identification et choix des opérateurs humains auxquels le système est destiné	97
Etablissement de la typologie circadienne du sommeil de ces opérateurs..	98
Détermination des horaires prévisibles de meilleure performance de ces opérateurs.....	99
Analyse de la tâche confiée à ces opérateurs	99
Etablissement du profil de poste des différents types d'opérateur humain.	101
Conclusion.....	103
Conclusion générale.....	105
Bibliographie	107
Annexe	123

Table des illustrations

Chapitre 1 : Notions de chronobiologie

- Figure 1 : Aspect sinusoïdal d'un rythme biologique 24
- Figure 2 : Exemples de rythmes biologiques circadiens 24
- Figure 3 : Les synchroniseurs de rythmes biologiques circadiens 26

Chapitre 2 : Les rythmes de la vigilance et des performances

- Figure 1 : Notions de vigilance 28
- Figure 2 : Modèle en U renversé de la relation vigilance-performance 28
- Figure 3 : Relation entre la vigilance et la performance 29
- Figure 4 : Effets de l'horaire du jour sur la vigilance subjective et sur 3 tâches de performance 31
- Figure 5 : La chronobiologie de la température centrale, du sommeil lent, du sommeil-éveil et de la vigilance au cours du nycthémère 34
- Figure 6 : Les différents modèles de la vigilance 35
- Figure 7 : Modèle d'autorégulation du sommeil de Borbely 35
- Figure 8 : Les 3 stades du modèle théorique de la vigilance du Monk 36
- Figure 9 : Ajustement du modèle de vigilance du Monk aux données actuelles 36
- Figure 10 : Les 3 paramètres du modèle de régulation de la vigilance d'Akerstedt et Folkard 37
- Figure 11 : Nomogramme de la vigilance d'Akerstedt et Folkard 38
- Figure 12 : Evaluation de la vigilance par la mesure de latence moyenne d'endormissement 39
- Figure 13 : Principales méthodes d'évaluation de la vigilance 39
- Figure 14 : La chronobiologie de la vigilance et les facteurs de sa dégradation 42

Chapitre 3 : Vigilance et accidents routiers

- Figure 1 : Principales conséquences de l'altération de la vigilance 44
- Figure 2 : Exemple de rythme des accidents routiers en Tunisie 46

– Figure 3 : Répartition horaire et nombre des accidents par somnolence au volant en fonction de l'âge sur la période de 1990-1992 aux USA.....	47
– Figure 4 : Modification du temps de réaction en fonction de la durée du sommeil et de celle de la tâche.....	48
– Figure 5 : Variation circadienne de l'alcoolémie.....	50
– Figure 6 : Particularités des accidents par hypovigilance du conducteur	53

Chapitre 4 : Facteurs humains et sécurité des transports ferroviaires guidés

– Figure 1 : Schématisation du comportement du conducteur de train en situation monotone.....	62
– Figure 2 : Place de la vigilance dans le processus cognitif humain aboutissant à l'action	65
– Figure 3 : Synthèse des principales raisons et limites de l'automatisation.....	68
– Figure 4 : Exemple de classification des modes d'exploitation et des modes de conduite.....	70
– Tableau 1 : Principaux rôles de l'opérateur de conduite dans des situations nominales et dégradées.....	72
– Figure 5 : Principaux acteurs impliqués dans la définition, la conception, la réalisation et la mise en exploitation des nouveaux systèmes.....	79
– Figure 6 : Modèle conceptuel « HEXAGONE » centré sur l'homme et la sécurité.....	82

Chapitre 5 : Approche d'application de la chronobiologie de la vigilance à la sécurité des transports ferroviaires guidés

– Figure 1 : Démarche d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires guidés.....	90
– Figure 2 : Exemple de classification d'un accident potentiel de type collision	92
– Figure 3 : Exemple d'erreur humaine impliquée dans un accident potentiel : collision par rattrapage entre trains	92
– Figure 4 : Exemple de rythme des accidents.....	94
– Figure 5 : Exemple d'erreurs potentielles provoquées par l'opérateur du PCC	94
– Figure 6 : Exemple d'erreurs potentielles provoquées par l'agent de maintenance	95
– Figure 7 : Principales causes d'hypovigilance à l'origine d'accidents	95
– Figure 8 : Principaux moyens instrumentaux de détection d'hypovigilance ...	96
– Figure 9 : Principaux moyens comportementaux de prévention d'hypovigilance.....	97

– Figure 10 : Les différentes catégories d’opérateur dans les transports ferroviaires	98
– Figure 11 : Typologie circadienne du sommeil et temps de meilleure performance des opérateurs humains	99
– Figure 12 : Les principaux facteurs impliqués dans l’analyse de la tâche.....	101
– Figure 13 : Démarche d’établissement du profil de poste des différents types d’opérateur humain	102

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Michel et Annick POTTIER et Yves DAVID pour le soin qu'ils ont porté à la correction de ce rapport.

Synthèse

La chronobiologie est l'étude des rythmes biologiques de l'homme. Ces différents rythmes se répartissent harmonieusement dans le temps réalisant une véritable structure temporelle complémentaire de la structure spatiale anatomique de l'organisme. Le maintien de la cohérence temporelle de l'organisme humain est une condition indispensable au maintien de son équilibre biologique, psychologique et social. Un rythme biologique peut être assimilé à une sinusoïde caractérisée par sa période, son amplitude et sa phase. Plusieurs familles de rythmes peuvent être identifiées selon la durée de la période : rythmes circadiens (période d'environ 24 heures), infradiens (période supérieure à 24 heures) et ultradiens (période inférieure à 24 heures). Les plus étudiés sont les rythmes circadiens. L'ensemble de ces généralités relatives à la chronobiologie a été développé dans le cadre du premier chapitre.

L'apport de la chronobiologie réside non seulement dans la mise en évidence de la structure temporelle de l'homme, mais également dans l'étude de ses différents rythmes de la vigilance et des performances. C'est ce que nous avons étayé dans le second chapitre en soulignant les faits suivants :

- Le concept de la vigilance comprend deux versants, un physiologique qui correspond au niveau d'éveil du système nerveux central et un psychologique défini par l'attention soutenue. L'attention est un concept associé à la vigilance qui traduit une aptitude psychologique majeure nécessitant des niveaux de vigilance déterminés pour contribuer à la fiabilité de l'opérateur humain dans des tâches de conduite de véhicules terrestres.
- Il existe une relation entre la vigilance et la performance représentée par un modèle de courbe en U renversé. Le niveau de performance augmente avec celui de la vigilance jusqu'à un optimum au-delà duquel la performance baisse avec l'augmentation du niveau de vigilance. Le niveau optimal de vigilance pour la meilleure performance varie selon les sujets, selon le nyctémère et selon le type de tâche.
- Le niveau de vigilance d'un individu varie au cours de la journée réalisant un rythme avec un maximum et un minimum se situant à des heures déterminées. Les horaires de baisse de la vigilance (13h à 16h et 1 h à 6 h) coïncident avec ceux d'altération des performances.
- A ce rythme circadien de périodicité 24 h environ, se superposent des fluctuations de la vigilance de période environ 90 mn et une forte propension au sommeil toutes les 12 h (à 15 h et à 3 h).
- La somnolence, telle que mesurée par la latence d'endormissement, démontre une périodicité circadienne marquée avec un maximum de besoin de sommeil au milieu de la nuit associé à une diminution majeure de la performance, ce qui explique la somnolence chez les travailleurs de nuit et la fréquence augmentée des erreurs et des accidents industriels à cette période du nyctémère.

- Le rythme veille – sommeil se caractérise par deux paramètres essentiels, la durée du sommeil et ses horaires spontanés habituels (endormissement et réveil) en dehors de toute contrainte extérieure. Les individus se répartissent différemment selon ces deux paramètres qui sont à l'origine d'une véritable typologie du sommeil. On distingue, selon les durées habituelles du sommeil, des gros dormeurs, des petits dormeurs et des moyens dormeurs. En pratique, on définit également selon les horaires spontanés du sommeil, des sujets du matin, des sujets du soir et des sujets intermédiaires. La matinalité ou la vespéralité est une caractéristique individuelle selon laquelle, les temps de meilleure forme des différents chronotypes sont nettement décalées dans la journée. Les sujets du matin ont un pic plus précoce, les gens du soir sentent qu'ils sont en meilleure forme l'après-midi. Les matinaux sont plus attentifs le matin et les vespéraux le soir. Les matinaux sont plus efficaces en termes de précision dans l'exécution de la tâche et les vespéraux en termes de rapidité.

Dans le troisième chapitre, nous avons mis l'accent sur l'apport de ces données chronobiologiques de la vigilance dans l'analyse de la sécurité routière. L'étude des différentes particularités des accidents routiers consécutifs à une baisse de la vigilance au volant a permis de révéler les constatations suivantes :

- Les études en laboratoire et sur véhicule ont montré que la somnolence détériore la performance de conduite. En effet, elle s'accompagne d'un allongement du temps de réaction, d'un ralentissement des processus d'intégration de l'information et d'une baisse de la mémoire à court terme avec une réduction des performances mentales. Le maximum de détérioration psychophysologique se situe entre 3 h et 5 h du matin, période du minimum de la vigilance.
- La somnolence au volant est la première cause d'accidents mortels, 34 % en France, 19 % en Australie et 13 % au Canada. Aux USA, elle représente 1 à 3 % de tous les accidents de véhicules et elle est à l'origine de 56 000 accidents annuels dont 1 550 décès. Durant la période de 1988 à 1992, 29 % des accidents mortels en France et 13 % des cas aux USA sont imputés à l'endormissement du conducteur.
- Le bilan effectué sur 15 ans (1979-1994) par l'ASSECAR (Association pour la Sécurité sur les Autoroutes) et l'ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes) a révélé que la fatigue, l'inattention, l'assoupissement au volant, et la baisse de vigilance qui en résulte est la première cause d'accidents mortels sur les autoroutes de liaison (28 %). Malgré l'amélioration nette de l'infrastructure, ce pourcentage demeure constant depuis 10 ans.
- Le camionnage est impliqué dans 5 % de tous les accidents de la route et dans 20 % des accidents mortels. Le manque d'attention serait la cause de 20 % des accidents impliquant des poids lourds et, dans 50 % des cas, le conducteur serait fautif. La fatigue est la cause initiale de 41 % des accidents de poids lourds aux USA. Le taux des accidents attribués à l'inattention des conducteurs de camions est estimé selon les études à 31 % ; 41% ; 54 %.
- Les horaires d'occurrence d'accidents sont variables selon les auteurs, mais se situent en moyenne dans les intervalles de 1 h-6 h de matin et de 13 h-16 h de l'après-midi. Ces pics s'expliquent par les fluctuations et l'altération des performances de conduite pendant ces moments précis de la journée. Ces horaires, compatibles avec le pattern circadien de la somnolence, soulignent l'étroite corrélation entre le rythme de la

vigilance et celui des accidents par somnolence au volant, abstraction faite des autres facteurs.

- Les accidents consécutifs à la somnolence au volant ont des caractéristiques variant avec l'âge. Les jeunes conducteurs âgés de moins de 45 ans ont plus d'accidents la nuit, sur voiture isolée et suite à un virage. Les conducteurs plus âgés sont victimes d'accidents surtout l'après-midi sur une même direction et suite à un arrêt non proportionné ou à un mouvement.
- Les jeunes conducteurs de sexe masculin, des travailleurs postés et des sujets atteints de pathologies du sommeil non traitées constituent une population à haut risque. Les jeunes conducteurs âgés de 16 à 29 ans courent 4 fois plus de risque que ceux qui sont âgés de plus de 30 ans. Ils sont à l'origine de 2/3 des accidents consécutifs à la somnolence au volant. Ils sont responsables de 35 % des accidents de la route entre 1989-1992. Le travail posté, de nuit ou supplémentaire est à l'origine de près de la moitié des accidents attribués à la somnolence au volant. 95 % des infirmières de nuit (12 h de travail) et 25 % des internes (24 h ou plus de travail) sont victimes d'accidents ou quasi – accidents pendant leur retour à la maison.
- Les principales causes d'accidents routiers par somnolence au volant sont : les troubles de sommeil, l'ingestion d'alcool et la prise de médicaments psychotropes. Les troubles du sommeil concernent sa durée, sa qualité et sa position dans le nyctémère (synchronisation) ; ils intègrent la dette de sommeil, la fragmentation du sommeil, la désynchronisation et les pathologies du sommeil.
- Les pathologies du sommeil comme le syndrome d'apnées du sommeil et la narcolepsie sont associées à un risque d'endormissement au volant et d'accidents 5 fois plus élevés que dans la population générale. Elles sont en cause dans 28 % des accidents de la voie publique et touche 20 % de la population générale en France.
- L'alcool est en cause dans 30 % des accidents mortels en France entraînant la responsabilité du conducteur, et 45 % avec un seul véhicule. Il interagit avec le rythme circadien et ou une restriction du sommeil pour aggraver la somnolence la nuit et l'après-midi, augmenter la détérioration de la performance de conduite et élever le risque d'accidents.
- La prise des médicaments psychotropes est à l'origine de 10 % des victimes des accidents de la route en Europe : 5 000 décès et 150 000 blessés chaque année.

Ces constatations ont poussé plusieurs auteurs à développer des méthodes de détection des hypovigilances du conducteur afin de les prévenir, de garantir une vigilance optimale au volant et d'améliorer ainsi la sécurité routière. Pour se faire, diverses études se sont orientées vers l'amélioration de l'état du conducteur ainsi que vers l'équipement du véhicule par des systèmes d'aide au maintien de la vigilance. Le principe de ces méthodes consiste à établir une corrélation entre les signaux physiologiques indiquant une hypovigilance (électro-encéphalogramme, électro-oculogramme), les données comportementales du conducteur (temps de fermeture des yeux, inclinaison de la tête vers l'arrière, posture, etc.) et les indices cinématiques (vitesse et trajectoire du véhicule, angles du volant, ...).

Les systèmes embarqués dans le véhicule représentent des dispositifs qui détectent de façon continue et non invasive la perte d'attention du conducteur et déclenchent un signal d'alarme visuel ou auditif pouvant conserver voire augmenter le niveau de vigilance du conducteur. D'autres classes de dispositifs sont destinées non seulement à détecter

l'hypovigilance et à avertir automatiquement le conducteur en cas de conduite « anormale » mais aussi à provoquer, le cas échéant, l'arrêt automatique du véhicule.

A côté des moyens instrumentaux de détection et de prévention des hypovigilances du conducteur, il existe des interventions comportementales ayant pour but l'éviction des facteurs de risque de somnolence. Elles consistent notamment à minimiser les effets d'une dette de sommeil par des courtes siestes de 20 à 40 mn, à aménager et adapter les horaires du travail au changement du rythme circadien, à améliorer l'hygiène de vie (éviter surtout l'alcool et la conduite après minuit) et à utiliser, si besoin, des substances éveillantes de type café ou médicaments (modafinil). Mais la prévention de la somnolence au volant par un sommeil adéquat avant la conduite ou lors des pauses reste le moyen le plus facile et le plus efficace.

L'ensemble de ces travaux affirme l'ampleur de l'insécurité routière liée à la baisse de la vigilance de l'homme (conducteur). Qu'en est-il des transports ferroviaires qui impliquent plusieurs opérateurs responsables de la sécurité des systèmes ? Les incidents et les accidents mettant en cause la sécurité des circulations dans ce domaine sont fréquemment dus à une erreur humaine. En effet, une étude bibliographique menée par l'INRETS a révélé que l'erreur humaine était considérée comme cause première de 270 accidents sur 1283 dont 113 collisions et 67 déraillements. Il en est de même de 103 déraillements par an en moyenne sur 1971-75, de 72 en 1987, de 64 en 1988, de 28 en 1989 et de 43 en 1990. C'est encore le cas pour le nombre de franchissements de signaux avec engagement du point protégé (25 en 1992 et 36 en 1993). La SNCF affirme que l'erreur humaine est à l'origine de 64 % des accidents ferroviaires. Entre 1985 et 1988, ces accidents ont été à la base de 144 morts et 239 blessés.

L'erreur humaine liée à une baisse de la vigilance est devenue un élément critique dans la fiabilité du système Homme-Machine. Les opérateurs humains dans le domaine du transport ferroviaire (contrôleurs au PCC, agents de conduite et agents de maintenance) sont soumis à plusieurs contraintes qui sont devenues plus nerveuses (psychologiques et comportementales) que physiques.

La non concordance des horaires de travail avec les horaires de meilleure forme et des pics de vigilance, impose un effort supplémentaire d'adaptation à ces horaires, augmentant ainsi la charge du travail et pouvant affecter la fiabilité de ces opérateurs.

De ce fait, le problème de la fiabilité dans les systèmes Homme-Machine est celui de la compatibilité entre les variations de l'état fonctionnel de l'opérateur et celles des exigences du travail.

Au vu de ces données, il nous a semblé judicieux d'analyser, dans un quatrième chapitre, quelques notions des facteurs humains liés à la sécurité des transports ferroviaires. Nous avons ainsi montré que :

- La fatigue chez les conducteurs peut avoir son origine dans les horaires décalés des services et dans la monotonie due à une inaction prolongée ou à un déficit du système informatif. L'hypovigilance en période monotone demeure le facteur essentiel de perte de contrôle et d'efficacité lors d'épreuve de conduite.
- Les incidences de la variabilité circadienne de l'état fonctionnel de l'opérateur humain sur la fiabilité ne sauraient être évaluées précisément sans que soit prise la mesure

-
- exacte des caractéristiques de la tâche (monotonie, absence d'intérêt), du niveau de ses exigences et de ses variations, de la place de l'activité de l'opérateur dans le système et des conditions dans lesquelles se déroule cette activité (bruit, chaleur, etc.).
- L'erreur humaine n'est souvent que l'impossibilité dans laquelle s'est trouvé un opérateur de faire face à une situation anormale, qu'il s'agisse de la défaillance d'un appareil ou d'un jeu de circonstances inattendues : changement organisationnel, de procédure, d'environnement ou même altération de rapports interindividuels ou interservices. L'erreur humaine est un symptôme révélateur d'une mauvaise organisation du travail, une formation insuffisante ou inadéquate. En la comprenant et la gérant elle peut devenir paradoxalement un élément de sécurité.
 - C'est plutôt, la mauvaise conception des matériels, l'intégration inadéquate Homme-Machine et la conception peu appropriée des Interfaces Homme-Machine qui sont les principales causes des accidents ferroviaires. La difficulté éprouvée par l'OH, lors de l'accomplissement d'une tâche, est d'autant plus importante que le système et l'interface Homme-Machine ne sont pas adaptés aux tâches dont il a la charge.
 - L'automatisation peut éviter des erreurs de manœuvre, mais elle ne peut en aucun cas supprimer les erreurs de conception ou les erreurs imprévues. Dans certaines situations critiques d'insécurité, l'OH peut être un facteur de fiabilité, en rétablissant le bon fonctionnement du système, parfois par des actions non prévues par le règlement de sécurité de l'exploitation mais, liées à sa connaissance, son expérience et son savoir-faire, il rattrape alors des erreurs commises par l'opérateur concepteur.
 - Même si la présence de l'OH est parfois une cause d'erreur, elle demeure indispensable. Il reste l'élément clef du système, le meilleur agent de fiabilité et joue un rôle déterminant dans des situations dégradées. Il le sera d'autant mieux que son rôle sera prévu dès la spécification des besoins et que l'automatisation sera centrée sur lui.
 - Il faut intégrer les facteurs humains dès la spécification des besoins et dès la conception du système afin de concevoir des systèmes qui s'adaptent à l'OH et non le contraire.

Toutes ces observations soulèvent l'ampleur du problème posé par l'erreur humaine dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires. Et pourtant, la première journée, en France, consacrée à la place des facteurs humains dans ce domaine, s'est déroulée le 19 septembre 2000. Notre contribution, dans le cadre du quatrième chapitre, porte essentiellement sur la proposition d'un modèle conceptuel centré sur l'homme et la sécurité des transports ferroviaires.

De plus, il n'existe à ce jour et à notre connaissance, aucune étude basée sur des données réelles d'accidents ferroviaires (retour d'expérience) pouvant conforter ou infirmer l'importance des notions de chronobiologie de la vigilance dans la genèse d'erreurs à l'origine des accidents. Nous proposons donc, dans le dernier chapitre, une approche méthodologique originale d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires.

Cette approche, qui est inspirée notamment des données et des résultats issus de l'analyse des accidents routiers par hypovigilance du conducteur, fait intervenir douze grandes étapes :

1. Le recueil des données d'accidents à partir d'une base de données (retour d'expérience) et/ou d'un travail prospectif à l'aide des techniques de recueil des connaissances (questionnaire, interview, analyse de protocole,...) ;
2. L'établissement de la liste des accidents dus à une erreur humaine ;
3. La détermination de la répartition temporelle de ces accidents (rythme des accidents) à partir de leurs horaires d'occurrence ;
4. La recherche d'une corrélation entre les horaires prévisibles d'hypovigilance (rythmes de la vigilance) et les pics d'occurrence des accidents dus à une erreur humaine (rythme des accidents) ;
5. L'établissement de la liste des causes d'accidents relatives à une erreur humaine ;
6. L'identification des différentes causes d'hypovigilance à l'origine d'accidents ;
7. L'élaboration des moyens instrumentaux et comportementaux de détection et de prévention des hypovigilances de l'opérateur humain (OH) ;
8. L'identification et le choix des OH (personnel de maintenance ou d'exploitation) auxquels le système est destiné ;
9. La détermination de la typologie circadienne du sommeil des OH choisis afin d'établir leur chronotype « du matin » ou « du soir » ;
10. La recherche de leurs horaires de meilleure performance en fonction du critère de matinalité – vespéralité ;
11. L'analyse de la tâche confiée à ces OH ;
12. L'établissement de profils de postes des différents types des OH en soulignant la nécessité de concordance entre leurs horaires de travail avec ceux de meilleure performance.

En dépit de quelques limites inhérentes notamment à la phase de recueil et d'analyse des données d'accidents à partir du retour d'expérience qui mérite une réflexion plus approfondie, cette approche permet de structurer les connaissances relatives à la chronobiologie de la vigilance. Elle offre un cadre méthodologique pour l'analyse et l'évaluation de l'hypovigilance en relation avec la sécurité ferroviaire.

Cette démarche dépasse le seul cadre des transports ferroviaire et pourrait fort bien s'adapter à d'autres domaines où l'on exige une sécurité absolue et un niveau optimal de vigilance.

Introduction générale

Avec près de 8 000 morts et 170 000 blessés par an (144 tués par million d'habitants), l'insécurité routière en France représente un enjeu de santé publique majeure. Le rôle légitime du conseil médical de la prévention routière est focalisé sur deux axes prioritaires : la vigilance et l'aptitude des conducteurs (Chabrol 2000). Dans ce vaste champ d'investigation, le taux d'accidents semble être constant depuis plusieurs années en France comme à l'étranger (Etats-Unis 13 %, Australie 19 %, France 25 %...) malgré l'amélioration des infrastructures et l'introduction de plus en plus poussée de l'automatisation. Le facteur humain est retenu comme cause principale de ces dysfonctionnements qualifiés de défaillance, d'erreurs humaines, de fatigue, d'inattention, de somnolence ou d'hypovigilance des opérateurs.

Le comportement du conducteur fait toujours l'objet d'investigations scientifiques destinées à déceler les causes présidant à la genèse des accidents. Mais, selon JP Galland, la connaissance sur le sujet est soit incomplète et mal structurée (le registre de recueil et de l'analyse des accidents survenus « fichier BAAC » est-il toujours adapté à l'analyse des facteurs de l'insécurité routière,), soit suffisante, mais sa traduction concrète n'est pas satisfaisante (la grande majorité des accidents de la route dus au comportement des conducteurs). Dans des recherches plus ciblées on doit insister plutôt sur la place de l'individu dans le système de circulation routière (thèmes à soutenir au cours du prochain programme PREDIT).

Dans le monde ferroviaire, la gestion du transport implique fréquemment des horaires irréguliers de travail et une monotonie de l'environnement qui tend à créer et à induire des phases de somnolence ou d'hypovigilance incompatibles avec les exigences de sécurité. L'amélioration de la fiabilité de l'opérateur humain, dans ce domaine, passe par la compréhension des processus cognitifs qui sous-tendent ses décisions en situations nominale et dégradée. L'ensemble des processus cognitifs aboutissant à une décision et à l'action (bien développé par Rasmussen) est sous-tendu par le niveau de vigilance (Dogui 1998) et (Hadj-Mabrouk H. et Dogui 1999).

La chronobiologie a dégagé la structure temporelle des rythmes biologiques chez les êtres vivants en particuliers chez l'homme. Elle a également mis en évidence les variations rythmiques de la vigilance et des performances humaines. La vigilance correspond ainsi, à des niveaux d'activation du système nerveux central soumis à des fluctuations rythmiques, au cours du nyctémère, de type circadien, ultradien et circasémidiem. Le niveau de vigilance de l'opérateur humain fluctue dans la journée avec des creux et des pics à des heures déterminées du nyctémère. Ces horaires sont compatibles avec le pattern circadien de la somnolence et s'accompagnent d'une baisse de la performance des opérateurs humains et risque accru d'accidents.

Ainsi, le maintien de la vigilance des opérateurs constitue une préoccupation essentielle en matière de sécurité des transports. L'implication d'une baisse de la vigilance de l'opérateur dans les accidents terrestres fait l'objet de divers travaux de recherche.

Cependant, la prise en compte de l'aspect chronobiologique de la vigilance, dans la genèse des accidents routiers, a été rarement abordée. De plus, peu d'études ont été consacrées au domaine des transports ferroviaires guidés, malgré la gravité des conséquences de ces accidents (Hadj-Mabrouk H. 1995b, 1996a et 1996b) et (Hadj-Mabrouk H. et Dogui 1999).

Cette étude présente donc une revue de la littérature comportant cinq grands chapitres. Les deux premiers chapitres présentent les principaux concepts relatifs à la chronobiologie de la vigilance et des performances. Ils soulignent l'intérêt du respect de la typologie circadienne du sommeil des opérateurs pour améliorer la fiabilité humaine. Le troisième chapitre traite des différentes particularités des accidents routiers consécutifs à l'hypovigilance du conducteur. L'intérêt de prendre en compte les facteurs humains dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires fait l'objet du quatrième chapitre. Le dernier chapitre propose une approche d'application de la chronobiologie de la vigilance dans l'analyse de la sécurité des transports ferroviaires qui s'articule autour de douze étapes chronologiques.

Chapitre 1

Notions de chronobiologie

L'observation des fonctions biologiques des êtres vivants montre qu'elles fluctuent dans le temps de manière prévisible avec une périodicité variable d'une fonction à l'autre mais assez stable pour la même fonction, réalisant ainsi des rythmes biologiques.

L'étude de ces rythmes biologiques définit la chronobiologie qui s'est développée à partir des années cinquante et qui est devenue une discipline scientifique avec de multiples ramifications touchant plusieurs domaines de la vie. La Chrono-thérapeutique étudie les rythmes d'efficacité des médicaments, la Chrono-pathologie étudie les rythmes des maladies, la *Chrono-vigilance* s'intéresse aux rythmes de la vigilance. Gadbois (1990) a présenté une revue sur la chronobiologie et son intérêt dans le domaine du travail et de la fiabilité.

Les différents rythmes biologiques se répartissent harmonieusement dans le temps réalisant une véritable structure temporelle complément de la structure spatiale anatomique de l'organisme. Ils apparaissent comme un système d'adaptation des organismes aux variations cycliques de l'environnement. Le maintien de la cohérence temporelle de l'organisme humain est une condition indispensable au maintien de son équilibre biologique, psychologique et social. Les rythmes les plus étudiés sont de type circadien, de période environ 24 heures.

Caractéristiques d'un rythme biologique

Un rythme biologique peut être assimilé à une sinusoïde caractérisée par les paramètres suivants :

- Sa période : qui est l'intervalle de temps séparant deux états identiques. Le paramètre fréquence (F) est l'inverse de la période ($F = 1/T$).
- Son amplitude : qui est l'intensité de la variation maximale à partir de l'état moyen.
- Sa phase : qui, mesurée par rapport à une origine, à partir d'un temps t de référence, est le temps que met le phénomène cyclique à atteindre son amplitude maximale.

A titre d'exemple, la température centrale suit une variation cyclique de périodicité de 24 heures, elle varie au cours de ces 24 h de 36,5°C à 37,5°C. L'état moyen étant de 37°C, l'amplitude de la variation est donc de 0,5°C.

Plusieurs familles de rythmes peuvent être identifiées selon la durée de la période : rythmes circadiens (période d'environ 24 heures), infradiens (période supérieure à 24 heures) et ultradiens (période inférieure à 24 heures). Les plus étudiés sont les rythmes circadiens. Dans ce contexte, une même fonction peut présenter des variations de périodicités différentes.

Figure 1 : Aspect sinusoïdal du rythme biologique

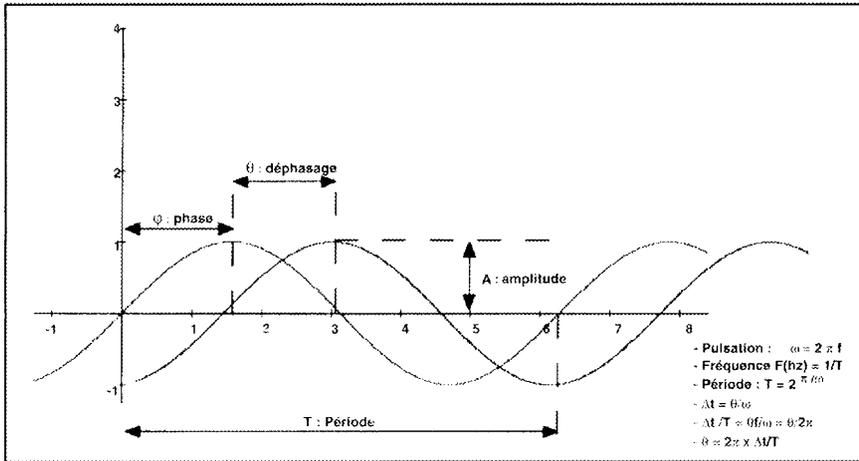
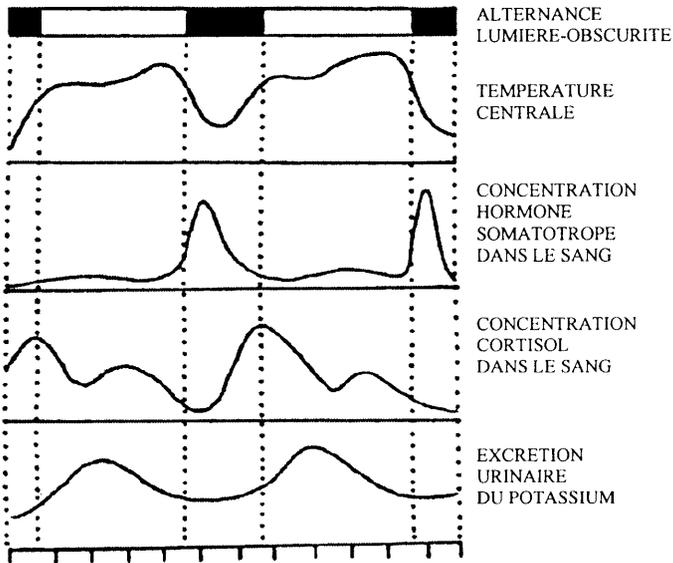


Figure 2 : Exemple de rythme circadien enregistré pendant 2 jours consécutifs de quelques paramètres physiologiques chez des sujets soumis au cycle d'activité-repos suivant : activité de 6 h 30 mn à 23 h et repos de 23 h à 6 h 30 mn (Caston 1993)



L'allure des courbes de la Figure 2 est différente d'un rythme à l'autre (amplitudes différentes, acrophases différentes). Ceci est dû à ce que les rythmes sont eux-mêmes la résultante de plusieurs autres activités rythmiques. Il existe donc un couplage entre de nombreux rythmes circadiens, traduisant l'existence d'une synchronisation interne de l'organisme.

Les différents cycles biologiques se superposent, se chevauchent, interfèrent, la plupart des fonctions biologiques étant soumises à plusieurs rythmes simultanément (activité cardiaque et respiratoire, température centrale). Qu'ils soient circadiens, ultradiens ou infradiens, les rythmes biologiques présentent une variabilité interindividuelle qui est parfois assez importante.

Propriétés des rythmes biologiques

Les phénomènes biopériodiques sont une propriété de la matière vivante à tous les niveaux d'organisation (structures moléculaires, cellules, tissus, organes,...). Ils sont d'origine endogène, leur transmission est héréditaire et sont synchronisés (Caston 1993).

Ils sont d'origine endogène

De nombreuses expériences montrent que les rythmes biologiques ne sont pas acquis sous l'influence des variations de l'environnement et qu'ils ont, par conséquent, une origine endogène. La nature endogène des rythmes circadiens est confirmée par leur persistance en l'absence de tout repère temporel et de tout synchroniseur externe, ils se mettent alors en libre cours (« free running ») et expriment leur période propre.

Leur transmission est héréditaire

Les expériences d'hybridation et de croisement et les études sur des jumeaux suggèrent que ces rythmes sont transmis génétiquement.

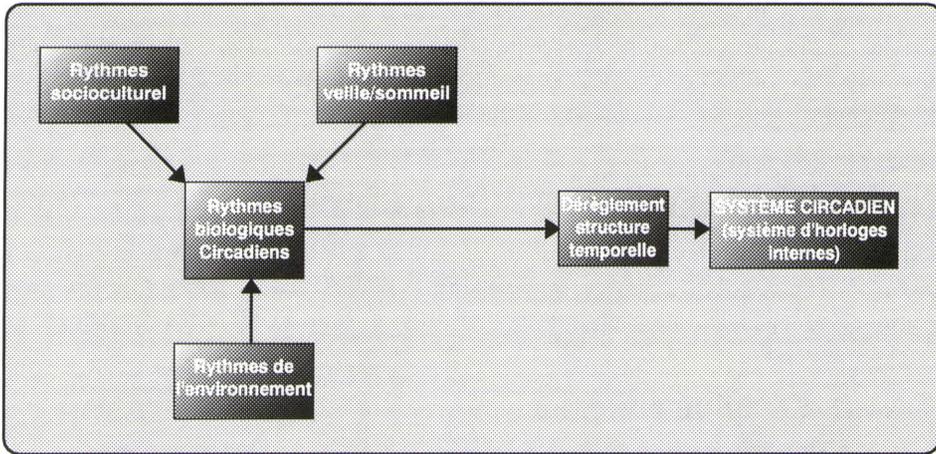
Ils sont synchronisés

Les variations cycliques de certains facteurs de l'environnement sont de véritables synchroniseurs qui interviennent sur l'amplitude et l'acrophase des rythmes biologiques, mais pas sur leur période.

En dehors de l'alternance jour/nuit (lumière/obscurité), le synchroniseur essentiel pour l'homme est de nature socioculturelle qui régit une alternance entre l'activité diurne et le repos nocturne liée aux impératifs de l'organisation sociale. Les lois socioculturelles qui régissent le comportement humain ont supplanté les lois biologiques (Figure 3).

La plupart des rythmes biologiques circadiens de l'homme sont influencés par l'alternance veille-sommeil car il existe un couplage très étroit entre le système veille-sommeil et les autres systèmes rythmiques de l'organisme. Le rythme veille-sommeil est lui-même sous la dépendance des rythmes socioculturels et c'est, par conséquent, l'ensemble des rythmes circadiens qui sont modulés par les rythmes de l'environnement social et culturel.

Figure 3 : Les synchroniseurs des rythmes biologiques (Hadj-Mabrouk 1999)



Signification des rythmes biologiques

Les différents rythmes d'un même organisme n'évoluent pas au hasard, mais se répartissent harmonieusement dans le temps réalisant une véritable *structure temporelle* complément de la structure spatiale anatomique. Ces rythmes biologiques apparaissent comme un système d'adaptation des organismes aux variations cycliques de l'environnement (rotation de la terre autour d'elle-même en 24 heures et autour du soleil en un an). L'organisme dispose en quelque sorte d'un système d'horloges biologiques internes appelé par Wever (1979) *système circadien* capable de mesurer le temps. Ce dernier comporte un ensemble d'oscillateurs (ou d'horloges biologiques) internes, auto-entretenus, interconnectés et hiérarchisés générant des rythmes influencés par un ensemble de synchroniseurs externes.

Conclusion

Il est bien évident qu'à l'instar des maladies qui apparaissent suite aux altérations de sa structure spatiale anatomique, l'homme peut présenter des symptômes dus au dérèglement de la structure temporelle. Le changement de phase des synchroniseurs tel que réalisé au cours du travail posté par exemple, peut être à l'origine d'une désynchronisation interne plus ou moins bien tolérée par les travailleurs, et dont les symptômes ressemblant à ceux de la dépression traduisent des difficultés d'adaptation de l'individu aux contraintes de changement des horaires du travail.

Ce support fondamental a permis d'entreprendre des recherches systématiques sur les effets de l'inadéquation entre les rythmes socioculturels et cosmiques et les rythmes de l'organisme humain. La chronobiologie *appliquée* est susceptible d'apporter des solutions visant, non pas à adapter l'Homme à son environnement social et culturel, mais, au contraire, à adapter cet environnement aux rythmes biologiques fondamentaux de l'Homme dont ceux de la vigilance et des performances.

Chapitre 2

Les rythmes de la vigilance et des performances

L'analyse des différents rythmes de la vigilance et des performances de l'opérateur humain aborde essentiellement l'aspect circadien de la vigilance, la typologie circadienne du sommeil, les différents modèles et méthodes d'évaluation de la vigilance ainsi que les principaux facteurs d'altération des rythmes de la vigilance.

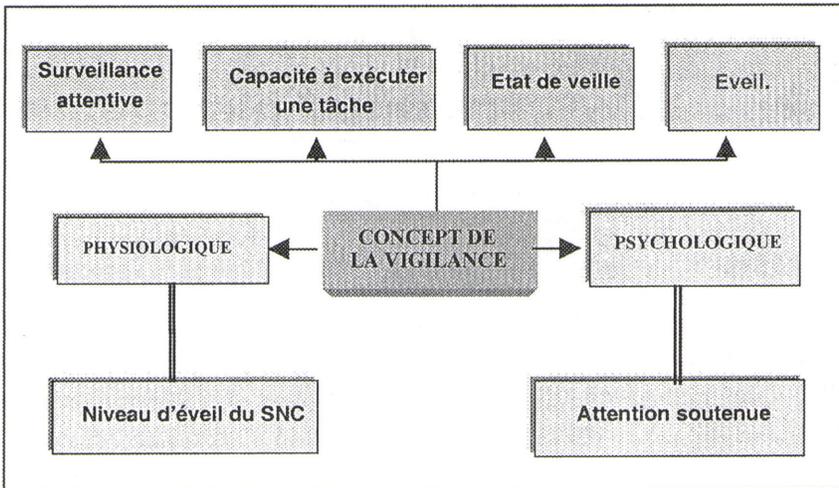
Notions de vigilance

Étymologiquement le terme de vigilance signifie *éveil*. Cependant selon les disciplines scientifiques (Neurophysiologie, Psychologie, Ergonomie...) il évoque la surveillance attentive, la capacité à exécuter une tâche, l'état de veille etc. (Grau et Amalberti 1995).

Les états de vigilance se réfèrent aux différents stades ou états qui surviennent au cours du cycle veille-sommeil (Sauvignon 1992). Ils correspondent à un état d'activation du système nerveux central allant du sommeil jusqu'aux états émotifs en passant par les états de veille diffuse et de veille attentive. Ce dernier stade représente la capacité maximale de l'opérateur humain à fournir une réponse optimale à une tâche donnée (Grau et Amalberti 1995). Toute tâche nécessite donc un niveau optimum de vigilance pour être accomplie. Le concept de la vigilance comprend deux versants, un physiologique qui correspond au niveau d'éveil du système nerveux central (SNC) et un psychologique défini par l'attention soutenue (Figure1) (Phillips-Bertin et Vallet 1994).

L'*attention* est un concept associé à la vigilance qui traduit une focalisation du niveau de l'activité perceptive, mentale et motrice et la prédominance de l'une ou de l'autre à un moment donné. La vigilance apparaît alors comme une condition nécessaire mais non suffisante au mécanisme de l'attention. Des niveaux de vigilance déterminés sont requis pour que des comportements d'attention apparaissent (Heintz et al. 1992). L'attention représente une aptitude psychologique majeure qui nécessite des niveaux de vigilance déterminés pour contribuer à la fiabilité de l'opérateur humain dans des tâches de conduite de véhicules terrestres (Fayada et Coutier 1995). Elle s'interprète en terme d'efficacité (réussite de tâche) ou de performance (vitesse et précision dans l'accomplissement de la tâche) (Bruni 1995).

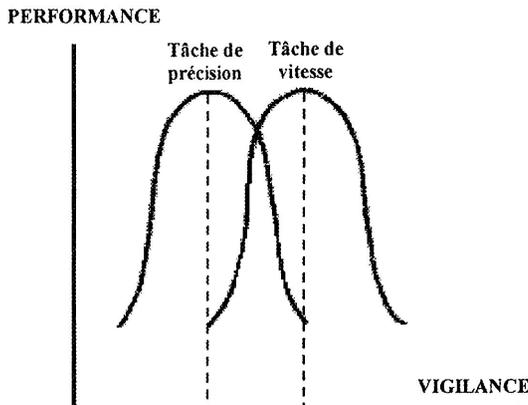
Figure 1 : Notions de vigilance (Hadj-Mabrouk 1999)



Relation vigilance – performance

Yerks et Dodson (in Anseau et Timsit-Berthier 1987) ont établi une relation entre vigilance et performance représentée par un modèle de courbe en U renversée. Le niveau de performance augmente avec celui de la vigilance jusqu'à un optimum au-delà duquel la performance baisse avec l'augmentation du niveau de vigilance (Figure 2).

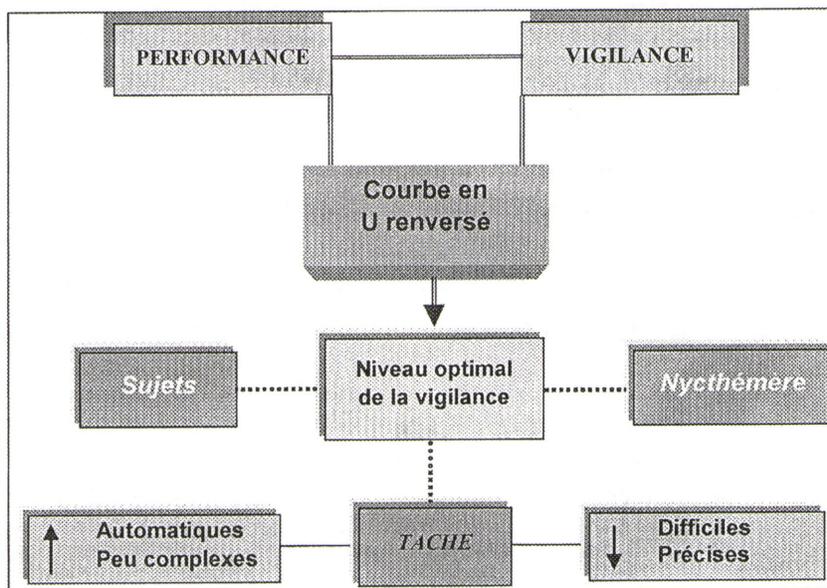
Figure 2 : Modèle en U renversé de Yerks et Dodson (adapté) (in Anseau et Timsit-Berthier 1987).



Le niveau optimal de vigilance pour la meilleure performance varie selon les sujets, selon le nyctémère et selon le type de tâche (Figure 3) : il est plus élevé pour les tâches automatiques et peu complexes et plus faible pour les tâches difficiles et précises (Anseau et Timsit-Berthier 1987). Ceci permet de comprendre qu'un niveau de vigilance

bas (privation de sommeil) ou élevé (stress) peut altérer les performances. Ce modèle en U inversée de la vigilance et de la performance, parfois critiqué, reste encore valable et permet de rendre compte de certains aspects de la performance (Anderson 1990).

Figure 3 : Relation vigilance – performance (Hadj-Mabrouk 1999)



Les différents rythmes de la vigilance

La plupart de nos facultés psychomotrices évoluent de façon prévisible en fonction de l'heure du jour et de la nuit. De nombreuses études ont montré que le niveau de vigilance d'un individu varie au cours de la journée avec un maximum et un minimum se situant à des heures déterminées. Il en est de même des performances (Benoit 1976).

Actuellement le rythme veille-sommeil n'est pas considéré comme une fluctuation entre deux niveaux extrêmes (être éveillé ou endormi) mais plutôt comme la variation cyclique sur 24 heures du niveau de la vigilance où, selon le moment, l'éveil ou le sommeil tend à l'emporter.

La chronobiologie de la vigilance peut être considérée sous plusieurs aspects : circadien, ultradien et circasémidien (Broughton 1989).

Aspect circadien

Les fluctuations de vigilance de nature circadienne sont réglées physiologiquement pour que la veille soit diurne et le sommeil nocturne. La phase de l'activité diurne est suivie d'une période de repos nocturne (sommeil réparateur) au cours de laquelle l'organisme restaure les dégâts (physique et psychologiques) subis durant l'éveil. Le

sommeil apparaît comme un besoin neurobiologique avec un *pattern* prévisible d'endormissement et d'éveil.

L'organisation temporelle de la vigilance montre que ses fluctuations correspondent à des variations cycliques similaires à celles représentées dans les différentes phases de sommeil. La vigilance fluctue physiologiquement entre son niveau le plus bas durant le sommeil et un niveau élevé lors de la veille attentive (Sauvignon 1992).

Les variations circadiennes mises en évidence, sont considérées comme l'expression comportementale de la variation cyclique du niveau d'activation conçue comme une extension du cycle veille-sommeil. Ce dernier est gouverné par deux types de facteurs, l'un homéostatique lié au besoin neurobiologique de sommeil et l'autre circadien correspondant à une horloge interne (pacemaker) de périodicité d'environ 24 heures (Gadbois 1990) et (Dinges 1995).

Les facteurs homéostatiques contrôlent les facteurs circadiens de telles sortes que ceux-ci règlent l'horaire d'endormissement et d'éveil. Ce cycle est influencé par celui de la lumière – obscurité (lumière – veille, obscurité – sommeil) ce qui explique la somnolence chez les travailleurs de nuit (Akersted 1995b) et (Samel et al. 1995).

La rythmicité circadienne est un phénomène continu même au cours de la période diurne. Les horaires de performance optimale sont variables, s'échelonnant selon les sujets de 7 h du matin à 7 h du soir. Le niveau des capacités fonctionnelles de l'opérateur humain s'avère changeant ; il présente une montée en puissance au cours de la matinée, atteint son maximum dans l'après-midi, puis commence à décliner quand s'avance la soirée. Durant la nuit, les performances ont tendance à se dégrader beaucoup plus rapidement que dans la journée (Gadbois 1990) et (Sauvignon 1992).

La somnolence, telle que mesurée par la latence d'endormissement, démontre une périodicité circadienne marquée avec un maximum de besoin de sommeil au milieu de la nuit associé à une diminution majeure de la performance, ce qui explique la fréquence augmentée des erreurs et des accidents industriels à cette période du nyctémère (Broughton 1989), (Folkard 1990), (Gadbois 1990) et (Sauvignon 1992).

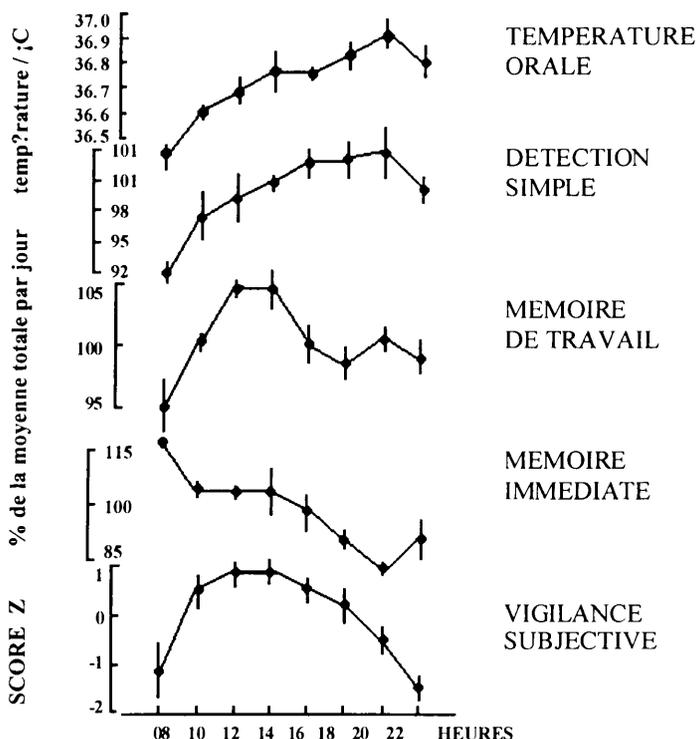
Les variations du niveau de la vigilance au cours de la journée s'accompagnent aussi de fluctuations des performances, en effet il existe un rythme de 24 heures des performances corrélé avec celui du niveau subjectif de la vigilance (Monk 1982) et (Fröberg 1997). L'horaire de meilleure performance dépend de plusieurs facteurs entre autres les caractéristiques de la tâche.

Pour des tâches simples (dextérité manuelle, détection) le pic de performance se situe l'après-midi, alors que pour des tâches cognitives de mémorisation plus complexes (raisonnement) les meilleures performances s'observent le matin. Pour une tâche de surveillance les erreurs de relevés sont deux fois plus nombreuses à 3 h du matin qu'entre 8 et 10 heures. Plusieurs types de tâches montrent différents rythmes circadiens de performance (Monk 1982, 1983, 1985), (Folkard 1990) et (Gadbois 1990) (Figure 4).

Pour Natale et al. (1997), le rythme des performances est net pour les tâches simples mais moins évident pour les tâches cognitives probablement masqué par des paramètres subjectifs (motivation). Gadbois (1990) signale que les variations circadiennes de la

performance dans des tâches de vigilance disparaissent en situation réelle de travail quand on fournit un effort particulier (motivation).

Figure 4 : Effets de l'horaire du jour sur la température orale, 3 tâches de performance et sur la vigilance subjective (Folkard 1990).



Plusieurs auteurs trouvent une relation de phase entre la variation circadienne de la vigilance et des performances et celle de la température corporelle. En effet, le système circadien est sous la dépendance de deux oscillateurs endogènes qui persistent en cas de changement de l'environnement ou de suspension du cycle veille – sommeil (dans les opérations soutenues). Ces deux oscillateurs sont à la base de l'association du rythme veille-sommeil et celui de la température (Winget et al. 1984), (Folkard 1990) et (Monk 1983 et 1985).

Typologie circadienne du sommeil – Performance

La plupart des études sur la vigilance et les performances montrent que le rythme veille – sommeil se caractérise par deux paramètres essentiels, la durée du sommeil et ses horaires spontanés habituels (endormissement et réveil) en dehors de toute contrainte extérieure (pendant les vacances par exemple). Ainsi, les individus se répartissent différemment selon ces deux paramètres qui sont à l'origine d'une véritable typologie du sommeil.

1. La durée du sommeil

Des différences individuelles de besoin de sommeil pour une population adulte ont été constatées depuis longtemps. Les durées habituelles de sommeil vont en général de 4 à 11 heures avec une très nette prédominance des durées comprises entre 7 et 8 heures. Dormir 8 heures est habituel et dormir 8 à 9 heures est nécessaire pour optimiser la performance. Trois chronotypes se distinguent selon la durée de sommeil (Carskadon et Roth 1991) et (Charaa 1998).

- Les gros dormeurs : dorment plus que 9 heures par jour (15 % des adultes)
- Les petits dormeurs : dorment moins de 6 heures par jour (10 % des adultes)
- Les moyens dormeurs : dorment entre 6 et 9 heures par jour (75 % des adultes).

La distribution des durées habituelles de sommeil (après exclusion des gens qui manifestent des troubles de sommeil) est asymétrique en faveur des gros dormeurs, ceux-ci sont un peu plus nombreux que les petits dormeurs, mais une nette prédominance des durées comprises entre 7 et 8 heures est constatée (Benoit et Aguirre 1996), (Johnson et al. 1983), (Lugaresi et al. 1983) et (Webb et Friel 1971). La proportion des gros dormeurs est plus fréquente chez les femmes et les durées moyennes du sommeil sont un peu plus longues chez elles (Broman et al. 1996) et (Broughton 1989).

2. Les horaires spontanés du sommeil

Les travaux actuels valorisent l'importance des facteurs individuels dans la gestion des horaires de coucher et de lever dans la mesure où l'on sait qu'ils relèvent de seuils physiologiques relativement précis (Charaa 1998). En pratique on définit également trois chronotypes selon les horaires habituels du sommeil :

- Les sujets du matin (type matin) : Ce sont des sujets qui se couchent avant 22 heures et se réveillent spontanément avant 7 heures en vacances. Les maxima de vigilance apparaissent plus tôt chez ces sujets.
- Les sujets du soir (type soir) : Ce sont des sujets qui se couchent tardivement, après minuit et qui se trouvent obligés de se lever le matin en période de travail. Les maxima de vigilance apparaissent plus tard chez ces sujets.
- Les sujets intermédiaires : Ils diffèrent des sujets du matin par une heure plus tardive de lever et du soir par une heure plus précoce de coucher.

Cette distinction serait surtout liée à des différences d'organisation temporelle du système neurophysiologique qui sous-tend la veille et on admet que la « matinalité » ou la « vespéralité » est bien une caractéristique individuelle. Le système circadien implique deux processus endogènes, un pacemaker circadien et un contrôleur de veille-sommeil dont l'association pourrait être à la base de la dimension de matinalité-vespéralité (Bougrine et al. 1997), (Natale et al. 1997a) et (Charaa 1998).

3. Les temps de meilleure forme

Plusieurs études trouvent une différence significative du temps de bonne forme en fonction de chronotype « Matin / Soir » en termes de niveau de vigilance, de temps de réaction, de fatigue et de dette de sommeil. L'horaire moyen de meilleure forme des différents chronotypes « Matin / Soir » est nettement décalé dans la journée. Les sujets du matin ont un pic plus précoce, les gens du soir sentent qu'ils sont en meilleure forme l'après-midi (Neubauer 1995), (Fröberg 1997) et (Chraa 1998).

Les matinaux sont plus attentifs le matin et les vespéraux le soir. Les matinaux sont plus efficaces en terme de précision dans l'exécution de la tâche et les vespéraux en terme de rapidité. Plusieurs facteurs sont différenciateurs de la performance : la durée de sommeil dans la nuit précédente, le cycle veille-sommeil, l'âge etc (Bruni 1995), (Caston 1993), (Bougrine 1997) et (Neubauer 1995).

L'intérêt de ces notions est indéniable pour le monde du travail. Le travail nocturne pour un sujet du *matin* ou diurne pour un sujet du *soir* impose un effort supplémentaire d'adaptation pouvant être à l'origine d'un surcroît de fatigue source d'une baisse de la fiabilité humaine.

Aspect ultradien

L'homme conserve pendant son sommeil aussi bien que pendant sa veille une périodicité ultradienne d'environ 90 minutes qui se superpose au rythme circadien de base. Il s'agit des alternances du sommeil lent et du sommeil paradoxal lors du repos nocturne et des alternances de niveaux de vigilance plus élevés et plus bas pendant la période diurne avec un maximum et un minimum toutes les 90 minutes.

Ce phénomène est expliqué par le fait que ces processus rythmiques sont gouvernés par différents systèmes d'oscillateurs (Broughton 1989) et (Sauvignon 1992). Taillard et Mouret (1991) soulignent l'existence de deux aspects circadien et ultradien de la vigilance. Elle suit un rythme circadien qui passe par un minimum en fin de nuit (entre 2 et 5 heures) et un maximum diurne situé en fin de journée.

Aspect circasémidienn

Les fluctuations circasémiennes de la vigilance se résument à une tendance biorythmique au sommeil avec une périodicité approximative de 12 heures. Le premier pic de propension au sommeil se situe l'après-midi (vers 15 h 30 mn) et le second au milieu de la nuit (Richardson et al. 1982), (Strogatz et al.1987) et (Broughton 1989).

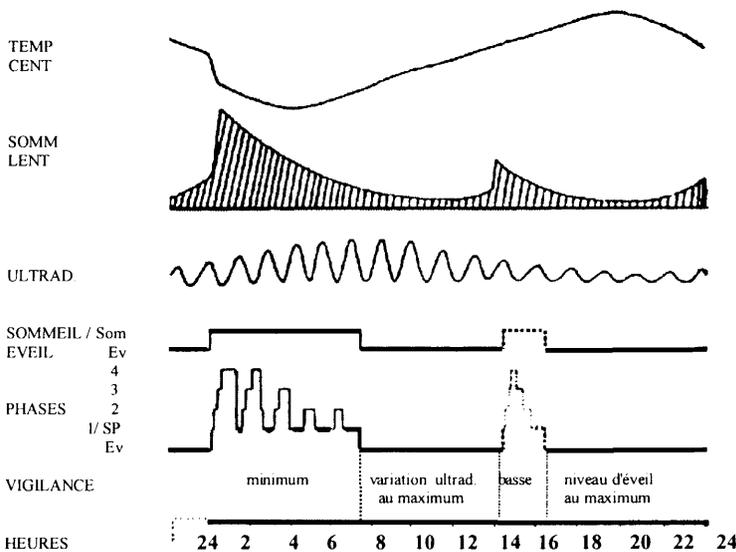
Une telle distribution bimodale est soutenue par les constatations suivantes (Broughton 1989) :

- La baisse de la latence du sommeil l'après-midi.

- Le moment de la sieste pour plusieurs cultures. La période appelée « somnolence post prandiale » consiste à une baisse du niveau de la vigilance après le repas de midi.
- La fréquence élevée des accidents causés par la somnolence l'après-midi.

Les trois aspects des fluctuations des rythmes de la vigilance sont intégrés dans la figure 5 qui représente pour un jour la chronobiologie de la température, du sommeil lent et de la vigilance.

Figure 5 : La chronobiologie de la température centrale, du sommeil lent, du sommeil-éveil et de la vigilance au cours d'un nyctémère (Broughton 1989)



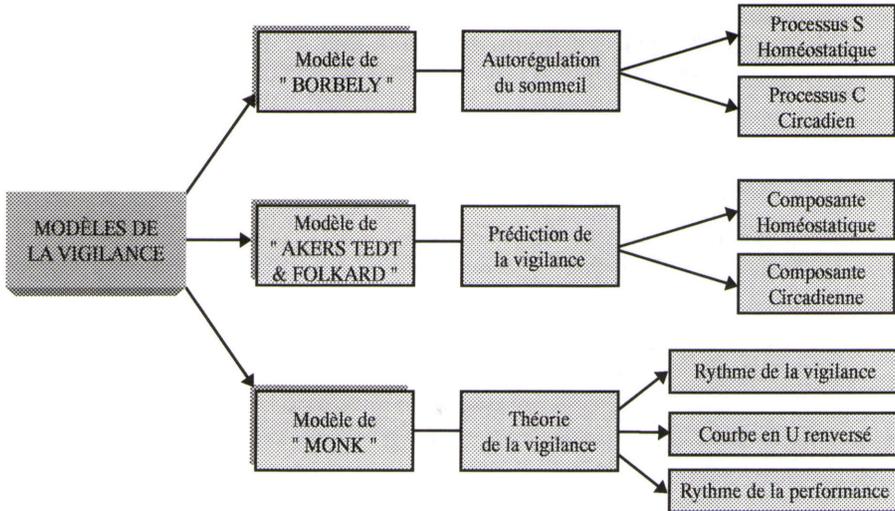
De ce schéma (figure 5), on retient que la probabilité de survenu de sommeil et de sa durée sont largement déterminées par la position de son début sur la courbe de température. La somnolence est maximale près du minimum thermique, mais la durée est relativement brève (4 à 5 heures). Inversement, près du maximum thermique, la latence d'endormissement est plus longue mais le sommeil est de plus longue durée (9 heures et plus) (Broughton 1989).

Cependant, ces rythmes de la vigilance ne sont pas immuables, en effet ils sont souples (il est possible de veiller la nuit), adaptables (le maintien d'une longue période d'éveil est suivi d'un sommeil plus long de récupération), influençables par l'environnement (température, richesse en stimulations, lumière), par les synchroniseurs externes (socioprofessionnels) et variables selon les conditions psychologiques (motivation, émotion) (Dogui 1998).

Les modèles d'évaluation de la vigilance

Généralement, on distingue trois types de modèle d'évaluation de la vigilance dont les principes sont présentés ci-après (Figure 6).

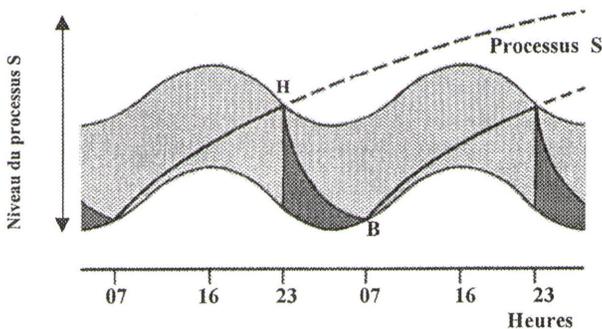
Figure 6 : Les différents modèles de la vigilance (Hadj-Mabrouk 1999)



Borbely (1982) a proposé un modèle d'autorégulation du sommeil basé sur deux principes distincts : un processus homéostatique S qui augmente régulièrement pendant l'éveil et diminue pendant le sommeil, et un processus circadien C indépendant du sommeil, qui correspond à l'oscillateur circadien influençant aussi bien la température centrale que la vigilance et le sommeil paradoxal. Le besoin et la durée du sommeil dépendent des niveaux des deux processus S et C à un moment donné (Figure 7).

Figure 7 : Modèle d'autorégulation du sommeil de Borbely (1982)

H : seuil haut et B : seuil bas du processus circadien C (grisé)



Monk (1982) a construit un modèle mathématique de la théorie de la vigilance divisé en trois stades. Il a conclu à un pic de la vigilance à 18h et à un déclin du rythme de la performance au cours de la journée (figure 8). Monk (1982) a ajusté ensuite son modèle avec les données actuelles pour trois tâches de mémorisation de difficulté croissante. Il souligne que la valeur optimale du niveau de la vigilance varie selon la tâche et qu'il existe un aspect multidimensionnel de la vigilance et de la performance (figure 9).

Figure 8 : Les trois stades du modèle théorique de la vigilance, 1. Rythme de la vigilance, 2. U renversé, 3. Rythme de la performance, V = valeur optimale de la vigilance (Monk 1982).

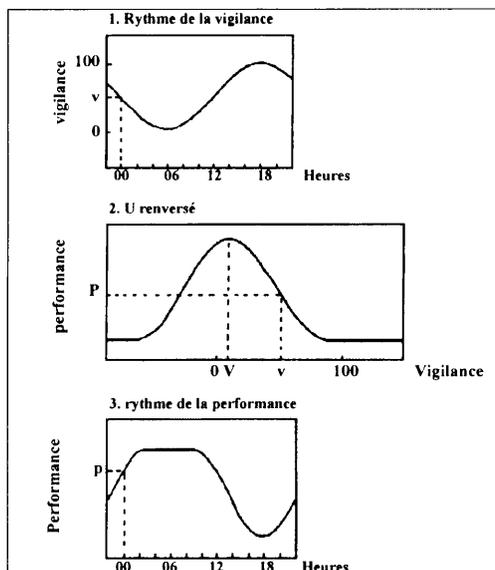
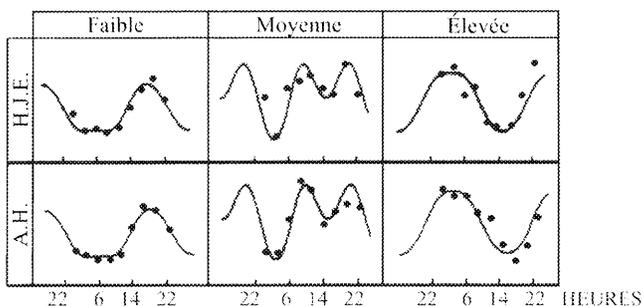
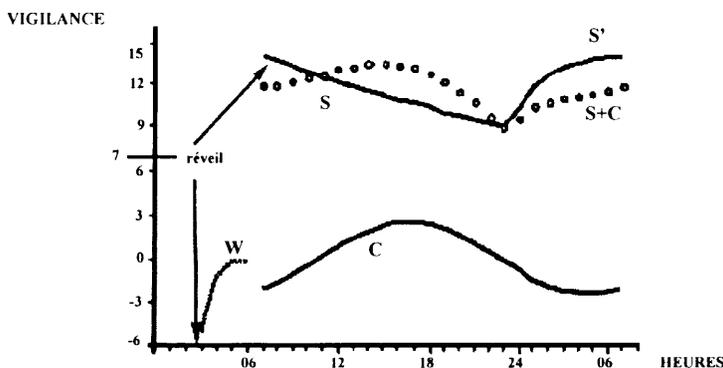


Figure 9 : Ajustement du modèle de la vigilance aux données actuelles (•) pour 3 tâches de Performance de difficulté croissante, chez deux sujets différents H.J.E. et A.H. (Monk 1982).



A partir du modèle de régulation du sommeil proposé par Borbely, Akerstedt et Folkard ont établi un nouveau modèle mathématique quantitatif de prédiction du niveau de vigilance durant l'éveil du jour. Ce modèle est basé sur une composante homéostatique S (durée du sommeil précédent) et une composante circadienne C (durée de l'éveil précédent) (Figure 10).

Figure 10 : Les trois paramètres du modèle de régulation de la vigilance : S = composante homéostatique durant l'éveil, S' = composante homéostatique durant le sommeil, C = composante circadienne et W = composante de réveil 7 = niveau de risque (Akerstedt et Folkard 1997)

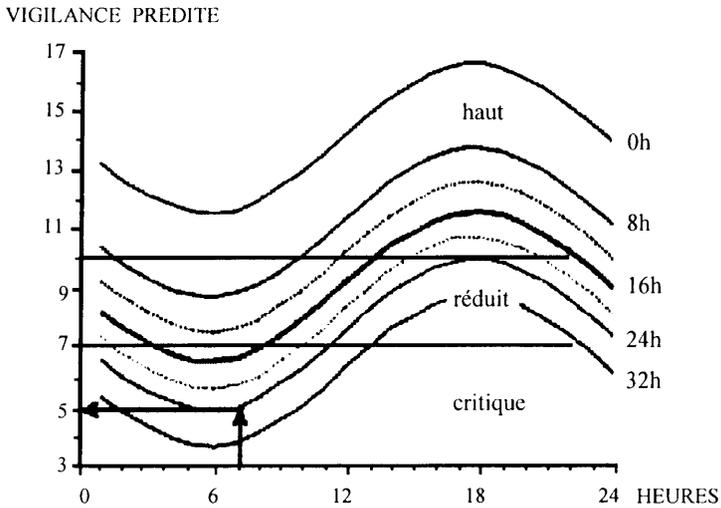


Le niveau de vigilance prédit est la somme arithmétique des deux fonctions S+C avec un score variant de 1 à 16 et un seuil de somnolence égale à 7. Un niveau de vigilance inférieur à 7 coïncide avec l'apparition de signes de sommeil à l'électro-encéphalogramme (EEG) et à l'électro-oculogramme (EOG) avec la sensation de somnolence chez les opérateurs. Ce modèle est validé au laboratoire par les résultats de l'EEG. L'effet combiné de S+C montre que la vigilance est à son maximum en début de soirée puis elle chute durant la nuit avec un creux tôt le matin (Akerstedt et Folkard 1997).

Le modèle d'Akerstedt et Folkard peut être appliqué pour une prédiction précise d'une réduction de la vigilance dans le domaine de travail posté. Il peut anticiper des états de somnolence pour différents décalages horaires (Akerstedt 1995c) et (Akerstedt et Folkard 1996 et 1997).

Akerstedt et Folkard (1997) ont proposé un nomogramme de la vigilance qui représente une variation circadienne de la vigilance après des heures d'éveil antérieur. Il est utile pour entraîner les travailleurs à rotation à optimiser les stratégies de veille-sommeil ou pour guider les administrations vers un programme de changement plus physiologique. Ce même type de nomogramme peut être utilisé pour l'endormissement, la performance et le sommeil prolongé (Figure 11).

Figure 11 : Nomogramme de la vigilance. Chaque courbe représente la variation circadienne de la vigilance après un certain nombre d'heures d'éveil antérieur (Akerstedt et Folkard 1997).



Méthodes d'évaluation de la vigilance

Les outils d'évaluation de la vigilance ont été développés dans le cadre de la pathologie de l'éveil et du sommeil. La somnolence diurne aiguë ou chronique peut être estimée par plusieurs tests utilisés dans les laboratoires d'exploration du sommeil :

ESS (Epworth Sleepiness Scale)

Epworth établit un score de somnolence chez les gens souffrant de troubles de sommeil. Un score de 10 à 14 correspond à une somnolence modérée, un score supérieur à 15 définit une somnolence sévère. Il a été appliqué pour rechercher une relation entre la somnolence et la performance en conduite automobile (Johns 1991).

SSS (Standard Sleepiness Scale)

C'est un score de somnolence standard qui comporte des stades de somnolence classés de 1 à 7 qui correspondent à 7 niveaux de vigilance (Hoddes et al. 1973).

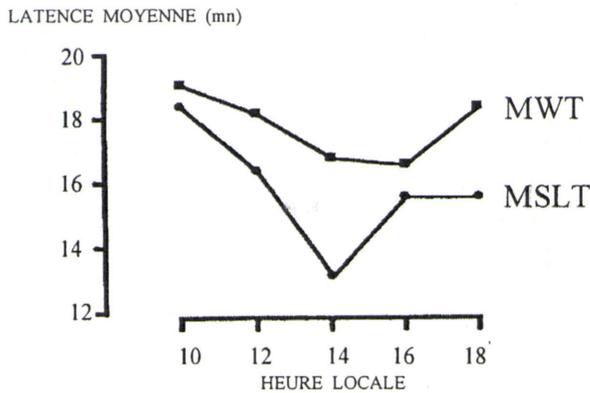
MSLT, MWT

Multiple Sleep Latency Test et Maintenance of Wakefulness Test sont des tests de laboratoire qui fournissent une estimation de la somnolence chronique. Le MSLT mesure la tendance à s'endormir. Le MWT mesure l'aptitude à rester éveillé (Figure 12). L'individu qui s'endort en moins de 15 mn (MWT) est considéré somnolent et ne peut conduire un véhicule (Carskadon 1986), (Carskadon et Dement 1987), (Mitler 1982) et (Mitler et Miller 1996).

Autres moyens d'évaluation de la vigilance

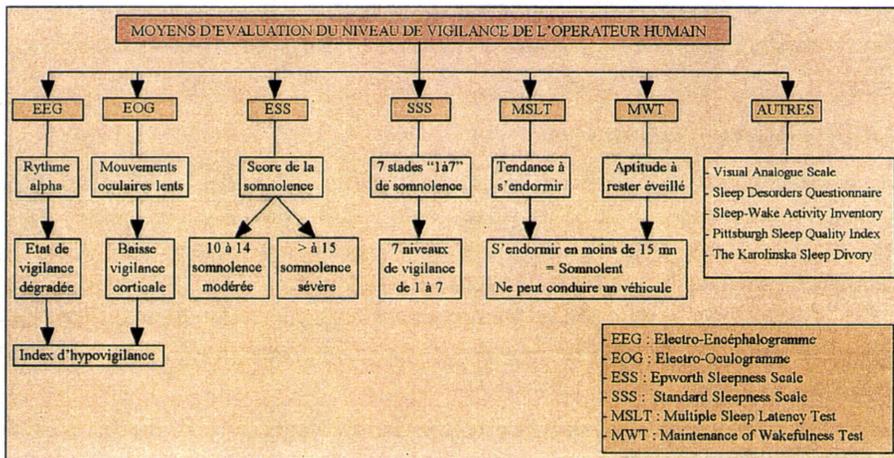
- VAS : Visual Analogue Scale (Wewers et Low 1990).
- Sleep Disorders Questionnaire (Douglas et al. 1994).
- Sleep-Wake Activity Inventory (Rosenthal et al. 1993b).
- Pittsburgh Sleep Quality Index (Buysse et al. 1989).
- The Karolinska Sleep Divory (Akerstedt et al. 1994).

Figure 12 : Latence moyenne d'endormissement chez le sujet normal au cours d'un test itératif d'endormissement (MSLT) et au cours d'un test itératif de maintien de l'éveil(MWT). La somnolence pourrait correspondre à la zone située entre les 2 courbes (Roussel 1995)



Quoique nombreux, l'application et l'efficacité de ces tests ne sont pas aussi évidentes en pratique et sur le terrain en matière de conduite automobile (Dinges 1995).

Figure 13 : Les principales méthodes d'évaluation du niveau de vigilance d'un opérateur humain (Hadj-Mabrouk 1999)



Les facteurs d'altération de la vigilance

Plusieurs facteurs peuvent interférer avec les rythmes de la vigilance et les altérer. Les plus impliqués sont les troubles de sommeil, l'ingestion d'alcool, la prise des médicaments psychotropes et l'âge.

Les troubles de sommeil :

Les troubles de sommeil concernent sa durée, sa qualité et sa position dans le nyctémère (synchronisation) ; ils intègrent la dette de sommeil, la fragmentation du sommeil, la désynchronisation et les maladies du sommeil.

1. La restriction du sommeil

Elle affecte la vigilance diurne et les performances psychomotrice et cognitive (attention, mémoire...). Ces altérations persistent après l'arrêt de la restriction et nécessitent un bon sommeil de récupération car les effets négatifs du manque de sommeil sur la vigilance sont cumulatifs avec une augmentation des plaintes située entre 4 et 8 h du matin. Les baisses de performances constatées dans des situations de privation de sommeil sont interprétées comme les corrélats de la réduction du niveau d'activation induit par le manque de sommeil (Carskadon et Dement 1981), (Dinges et al. 1997), (Gadbois 1990), (Mikulencer et al. 1989) et (Naitoh 1992).

2. La fragmentation du sommeil

Qu'elle soit de causes internes (maladie, troubles de sommeil non traités) ou externes (bruit, lumière) elle affecte négativement la qualité et la quantité du sommeil. Elle engendre le jour suivant un déséquilibre dans la qualité de l'éveil préjudiciable à la performance. Dans les 24 h précédant un travail, la fragmentation du sommeil ou sa courte durée sont des facteurs critiques de prédiction des accidents liés à la somnolence. Le déclin du niveau de vigilance est similaire à celui induit par une perte de 40 à 64 h de sommeil. Un bon sommeil nocturne est en rapport avec l'augmentation de la vigilance diurne (Bonnet 1985 et 1996), (Dinges 1995), (NCSDR/NHTSA 1999) et (Sauvignon 1992).

3. La désynchronisation

La désynchronisation traduit un désordre du système circadien et un défaut dans l'organisation temporelle de l'individu. Elle représente une anomalie de la synchronisation entre l'horloge circadienne et l'environnement social. Elle est responsable de troubles de sommeil, de fatigue et de détérioration des performances et du bien être. Elle s'observe en cas d'avance de phase du cycle veille-sommeil (décalage horaire : syndrome de Jet Lag) ou en cas de raccourcissement du cycle activité-repos (travail posté) (Folkard 1990) et (Winget 1984).

Le travail posté altère la performance et la vigilance durant les horaires de nuit et les jours de repos faisant suite au travail de nuit. La baisse de performance nocturne chez les

travailleurs postés est due au fait que l'homme est une espèce diurne (Akersted 1995a, 1995b et 1995c) et (Folkard et Totterdell 1995).

4. Les maladies du sommeil

Les maladies du sommeil comme le syndrome d'apnées du sommeil et la narcolepsie sont responsables de somnolence diurne qui altère les performances physiques et mentales. Elles risquent d'induire des conséquences néfastes sur la sécurité au travail (Sauvignon 1992).

L'ingestion d'alcool

L'alcool affecte toutes les fonctions mentales et physiques et notamment la vigilance et les performances psychomotrices. Il interagit avec le rythme circadien pour aggraver la somnolence au cours de la nuit et de l'après-midi (Horne et Baumber 1991), (Horne et Gibbons 1991) et (Roehrs 1994).

La prise de médicaments psychotropes

La prise des anxiolytiques benzodiazépiniques, des sédatifs antihistaminiques (anti H1) ou des antidépresseurs tricycliques provoque des perturbations du comportement, des activités mentales, des fonctions visuelles, du sommeil, de l'attention et de la vigilance (Lagier 1995), (Lemoine 1995) et (Billiard 2000).

L'âge avancé

Le vieillissement s'accompagne d'altérations physiques et cognitives, de réduction des capacités visuelles et auditives et de modifications du rythme veille-sommeil. Il peut affecter ainsi les performances (HU PS et al. 1998) et (Joly et al. 1995).

Autres facteurs d'altération de la vigilance

1. Le stress

qu'il soit secondaire à une privation de sommeil, un travail physique prolongé ou un déficit calorique, entraîne un changement du rythme circadien de la performance (augmentation des oscillations à 20-40 % de la moyenne de 24 h, avec une crête l'après-midi et un creux tôt le matin). Le maximum des oscillations apparaît le quatrième jour de stress et la détérioration de performance est plus importante en fin de nuit. L'humeur connaît des fluctuations similaires à celles de la performance, elle est un bon élément de prédiction de la performance sous l'influence de stress (Bugges et al. 1979).

2. Les facteurs d'ambiance

Le bruit, les vibrations et la chaleur peuvent affecter la vigilance (Petit et Tarrier 1991).

3. La privation sensorielle

Elle entraîne une baisse massive de la vigilance sans majoration des erreurs opérationnelles. Le stress monotone est plutôt le résultat de l'effort physiologique nécessaire pour qu'un niveau de vigilance permette une performance adéquate dans des conditions monotones (Peter 1990a).

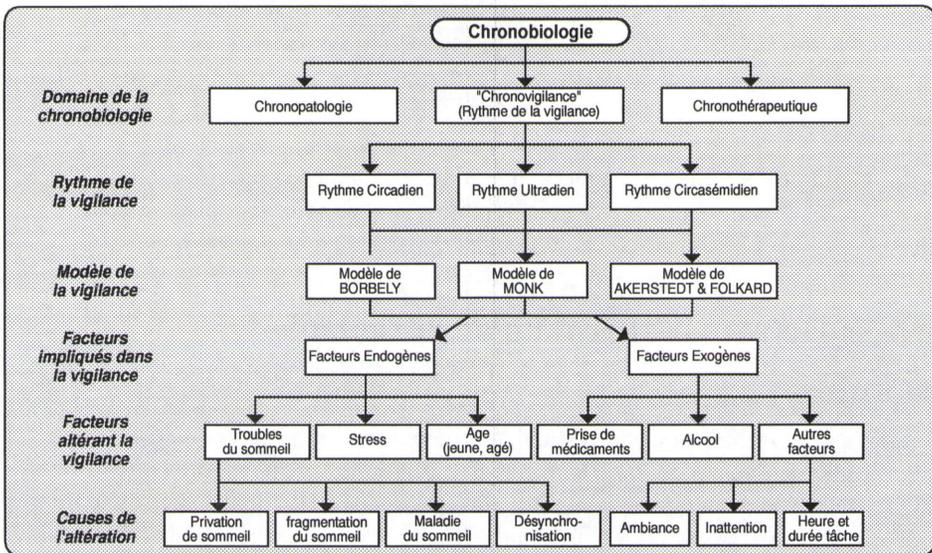
4. L'exposition à une lumière brillante

L'exposition à une lumière brillante durant une nuit augmente la capacité de rester éveillé et améliore la vigilance, mais ce gain est suivi d'une baisse de l'humeur et de la motivation. Elle aide les travailleurs postés et le personnel en décalage horaire à s'adapter à la perturbation de phase circadienne (Czeisler et al. 1990), (Daurat et al. 1996) et (NCSDR/NHTSA 1999).

Conclusion

L'ensemble des concepts relatifs au domaine de la chronobiologie de la vigilance sont synthétisés dans la figure 14.

Figure 14 : La chronobiologie de la vigilance et les facteurs de sa dégradation (Hadj- Mabrouk 1999)



Chapitre 3

Vigilance et accidents routiers

L'amélioration de la sécurité des transports routiers nécessite des efforts soutenus et constants d'amélioration des infrastructures et des véhicules et de compréhension des défaillances du conducteurs afin de les prévenir. La tâche de conduite demande un niveau optimum de vigilance pour garantir la sécurité routière. Plusieurs recherches montrent que l'altération de la vigilance est une cause d'accidents aussi importante que l'excès de vitesse ou l'imprégnation alcoolique (Dinge1992) et (Sauvignon 1992). En effet, l'hypovigilance ou la somnolence altèrent des éléments de la performance qui sont critiques pour la sécurité de la conduite ou peuvent aboutir à des accidents. Le maintien de la vigilance du conducteur est devenu de ce fait un enjeu important dans la sécurité routière (Chich 1991).

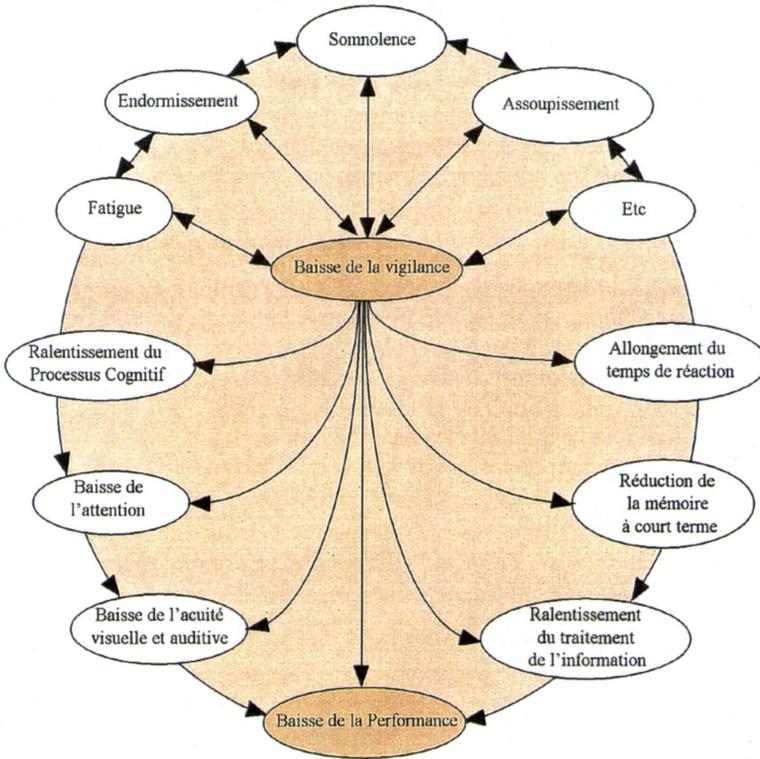
Les différents travaux sur les accidents de la route ont mis l'accent sur les conséquences de l'altération de la vigilance, l'analyse des caractéristiques des accidents par hypovigilance, les facteurs favorisant l'endormissement au volant, les moyens de détection de l'hypovigilance du conducteur et les mesures de prévention du risque d'accident.

Les études en laboratoire et sur véhicule ont révélé que la somnolence détériore la performance de conduite (Figure 1) car elle s'accompagne d'un allongement du temps de réaction pouvant être à l'origine d'une nette augmentation du risque d'accident surtout en cas d'excès de vitesse et d'un ralentissement des processus d'intégration de l'information avec une baisse de la mémoire à court terme et une réduction des performances mentales (objectivées par des tests basés sur des tâches d'attention) (Dinges 1992) et (NHTSA 1999). Ainsi la veille prolongée entraîne une détérioration de la performance en diminuant le niveau de vigilance. Il s'ensuit un allongement du temps de réaction avec une élévation du nombre d'erreurs pour une tâche de traitement d'une information simple ou de raisonnement logique et une dégradation de la mémoire à long terme (Roussel 1991).

L'hypovigilance s'observe dans la conduite en général. Elle a été expérimentalement observée chez des sujets jeunes, sains, sans antécédents neurophysiologiques, sous aucun traitement médicamenteux ou drogues illicites, ayant de bonnes habitudes de conduite, et une bonne hygiène de vie, le lendemain d'une nuit de sommeil de bonne qualité. Elle s'observe davantage dans des situations de conduite à risque (conduite de nuit ou durant de longues périodes). Le maximum de détérioration psychophysologique se situe entre 3h et 5h du matin, période du minimum de la vigilance (Roussel 1991) et (Chich 1991).

Néanmoins le niveau de somnolence peut être masqué temporairement par les stimulants et l'activité physique, si bien que le sommeil survient rapidement dans les tâches de performance répétitive (conduite sur longue distance) ce qui accroît le risque potentiel d'accidents (Mittler et al.1988).

Figure 1 : Principales conséquences de l'altération de la vigilance (Hadj-Mabrouk et al. 2001)



Epidémiologie des accidents par hypovigilance du conducteur

De nombreux auteurs ont publié des résultats d'études sur les taux d'accidents dus à la somnolence ou à l'hypovigilance au volant. Les chiffres obtenus varient selon le type d'infrastructure, la période et le pays concerné, ainsi que selon la nature des accidents pris en compte, et sont difficilement comparables d'une étude à l'autre. Ils confirment cependant tous l'importance de ces phénomènes pour la sécurité routière.

Pack et al. (1995) affirment que les accidents de la route dus à l'hypovigilance du fait d'un manque de sommeil sont aussi nombreux et graves que ceux dus à l'alcool ou à l'excès de vitesse.

Berrichi et al. (1991) trouvent que 91 % des accidents d'automobile sont attribués aux facteurs humains : hypovigilance, fatigue, endormissement. Lafont (1991) signale que la majorité des accidents est due à une défaillance humaine et que la baisse de la vigilance est la première cause d'accidents mortels sur autoroute dans 25 % des cas.

Un bas niveau d'attention, une vigilance faible ou une distraction sont présents dans 60 scénarios types d'accidents parmi 61 élaborés par Van Esland et al. (1997).

Durant la période de 1988 à 1992, 29 % des accidents mortels en France et 13 % des cas aux USA sont imputés à l'endormissement du conducteur (Planque et al. 1995).

Le bilan effectué sur 15 ans (1979-1994) par l'ASSECAR (Association pour la Sécurité sur les Autoroutes) et l'ASFA (Association des Sociétés françaises d'Autoroutes) a révélé que la fatigue, l'inattention, l'assoupissement au volant, et la baisse de vigilance qui en résulte est la première cause d'accident mortel sur les autoroutes de liaison (28 %). Malgré l'amélioration nette de l'infrastructure, ce pourcentage demeure constant depuis 10 ans (Boussuge et Lafont 1995).

La somnolence au volant est la première cause d'accidents mortels, 34 % en France, 19 % en Australie et 13% au Canada. Aux USA, elle représente 1 à 3 % de tous les accidents de véhicules et elle est à l'origine de 56 000 accidents annuels dont 1 550 décès (Philips-Bertin et Vallet 1994), (Montplaisir et al. 1995), (Lyzniki et al 1998) et (NCSDR/NHTSA 1999).

Une enquête effectuée par Philips-Bertin et Vallet (1994) auprès de 323 conducteurs automobiles a révélé que la plupart d'entre eux (90 %) ont des signes ou des symptômes qui leur indiquent une baisse de vigilance pendant la conduite et qu'ils mettent en œuvres des pratiques personnelles pour maintenir leur niveau de vigilance.

Mitler et al. (1997) retrouvent chez les conducteurs de poids lourds un déficit de sommeil incompatible avec le niveau de vigilance nécessaire pour ce type de travail. Tardif (1995) trouve que le camionnage est impliqué dans 5 % de tous les accidents de la route et dans 20 % des accidents mortels. Le manque d'attention serait la cause de 20 % des accidents impliquant des poids lourds et dans 50 % des cas le conducteur serait fautif. La fatigue est la cause initiale de 41 % des accidents de poids lourds aux USA (Muzet et Clot 1995). Le taux des accidents attribués à l'inattention des conducteurs de camions est estimé selon les études à 31 % ; 41 % ; 54 % (Mackier et Wylie 1991).

Le rythme des accidents par somnolence au volant

Certains travaux consacrés aux accidents de la route suggèrent que les accidents par hypovigilance ne surviennent pas aléatoirement au cours de la journée mais présentent souvent un rythme de périodicité de 24 heures avec des pics et des creux à des heures déterminées. Le maximum de risque coïncide souvent avec les horaires de minimum de vigilance, en milieu de l'après-midi (heure de la sieste) et tard la nuit et tôt le matin (période de forte propension au sommeil). Ces horaires sont compatibles avec le pattern circadien de la somnolence. Ainsi, une statistique portant sur les seuls accidents de la route impliquant des véhicules isolés, de ce fait imputables exclusivement au conducteur, a conclu à une variation de type circadien dans laquelle le taux horaire d'accidents présente une valeur maximale nocturne supérieure de 180 % au taux horaire moyen des 24 heures, et une valeur minimale en fin d'après-midi inférieure de 90 % à ce même taux moyen Gadbois 1990).

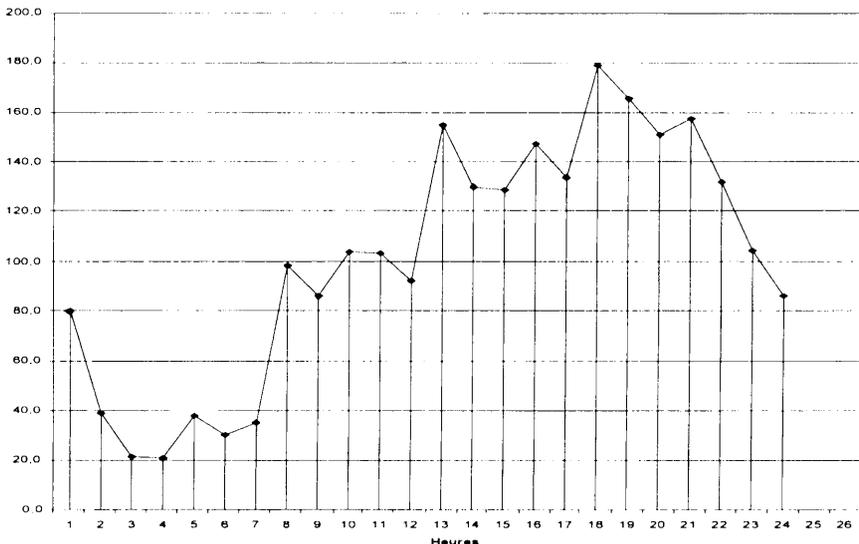
Folkard (1997) retrouve un rythme circadien de 24 h du risque des accidents de la route avec un pic vers 3 h. En plus de la propension au sommeil, ce pic peut s'expliquer aussi par une baisse des performances. Lenne et al. (1997) signalent que les performances de conduite automobile fluctuent dans la journée. Les performances sont altérées en début d'après-midi et tard la nuit et tôt le matin.

Pack et al. (1995) comptabilisent durant les années 1990-1992, 4 333 accidents de la route dus à l'endormissement du conducteur. Ces accidents surviennent à deux moments de la journée : de minuit à 7 h du matin (période de forte propension au sommeil) et en milieu d'après-midi (heure de la sieste). L'analyse de 204 accidents fatals survenus en BAVIERE durant 1991 révèle que l'endormissement au volant était la cause la plus fréquente. La fréquence maximale des accidents se situait aux environs de 6 h du matin et 2 h de l'après-midi (Zulley et al. 1995).

Selon Sauvignon (1992), la vigilance tend à décroître périodiquement deux fois par 24h, entre 15h et 17 h et surtout entre 2 h et 5 h ; cette diminution de l'attention serait responsable des deux pics d'accidents de voiture. Roussel et al. (1995) trouvent que la tendance à l'endormissement prédomine de 13 h à 15 h et de 1 h à 5 h. Levine et al. (1995) retrouvent une prédominance des accidents de la route l'après-midi et les jours de week-end.

Plusieurs études concernant les accidents de la voie publique dans la région de Sousse-Tunisie ont révélé un rythme circadien des accidents. Le pic d'accidents survient à la fin de l'après-midi : entre 16 h et 20 h et le creux tôt le matin entre 1 h et 6 h (figure 2). Ces accidents touchent surtout les jeunes adultes de sexe masculin et sont plus fréquents dans la saison estivale. Ces résultats sont à pondérer par la densité de trafic et le mode de vie (Dogui 1998), (Omri 1993), (Ferchichi 1998), (Amara 1994) et (Ben-Hammouda 1994).

Figure 2 : Exemple de rythme des accidents routiers en Tunisie (Dogui 1998)



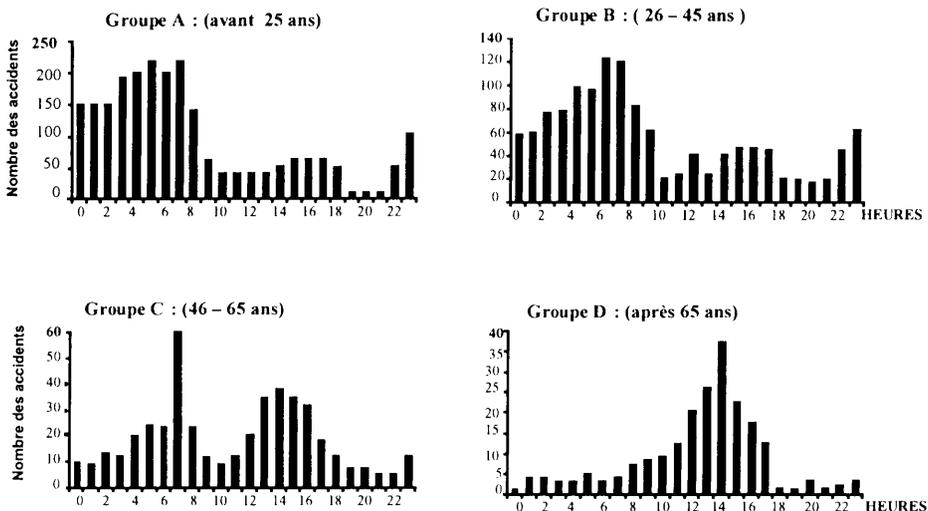
Ces travaux montrent une évidente corrélation entre le rythme de la vigilance et celui des accidents, abstraction faite des autres facteurs. En effet, les accidents consécutifs à la somnolence au volant se produisent surtout tard la nuit (après minuit) avec un deuxième pic plus faible au milieu de l'après-midi. Ces horaires sont compatibles avec le pattern circadien de la somnolence (Pack et al. 1995), (Wilkins et al. 1997), (Knippling et Wang 1994), (Langois et al. 1985), (Lavie et al. 1986), (Mitler et al. 1988), (Maycock 1996), (Mc Cartt et al. 1996).

Caractéristiques des accidents par hypovigilance

Ces accidents qui ont souvent lieu avec une voiture isolée impliquant un seul conducteur, roulant à grande vitesse et qui n'a pas tenté d'éviter l'accident (allongement du temps de réaction) entraînent une forte mortalité et morbidité (Horne et Reyner 1995b), (Knippling et Wan 1994), (Mc Cartt et al. 1996), (Maycock 1996), (Pack et al. 1995), (Wan, Knippling et Goodman 1996) et (Wilkins et al. 1997).

Les accidents consécutifs à la somnolence au volant ont des caractéristiques variant avec l'âge (figure 3). Les jeunes conducteurs âgés de moins de 45 ans ont plus d'accidents la nuit, sur voiture isolée et suite à un virage. Les conducteurs plus âgés sont victimes d'accidents surtout l'après-midi sur une même direction et suite à un arrêt non proportionné ou à un mouvement tournant (Wilkins et al. 1997), (Pack et al. 1995) et (Wan, Knippling et Goodman 1996).

Figure 3 : Répartition horaire et nombre des accidents par somnolence au volant en fonction de l'âge sur la période de 1990 à 1992 aux USA (l'alcool est non impliqué) (NCSDR/NHTSA 1999)



Les causes d'accidents par somnolence au volant

Les principales causes d'accidents routiers par somnolence au volant sont : les troubles de sommeil, l'ingestion d'alcool et la prise de médicaments psychotropes. Les troubles du sommeil concernent sa durée, sa qualité et sa position dans le nyctémère (synchronisation) ; ils intègrent la dette de sommeil, la fragmentation du sommeil, la désynchronisation et les maladies du sommeil (narcolepsie, syndrome d'apnées du sommeil) (Lyzniki et al. 1998) et (Hadj-Mabrouk et al. 2001).

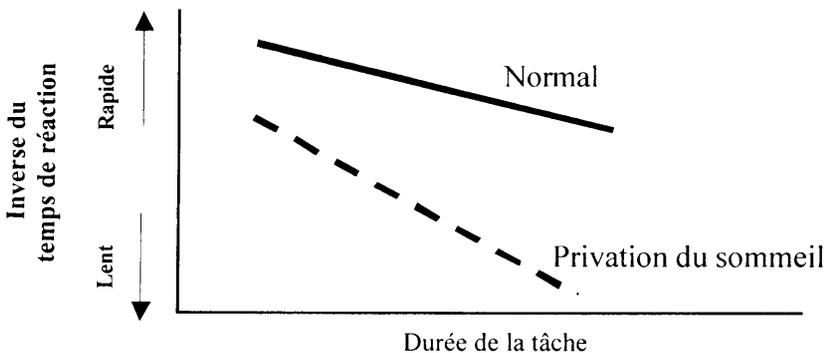
Les troubles de sommeil

1. La dette de sommeil

La privation de sommeil est à la base d'une limitation des capacités cognitives et perceptives et représente un facteur accidentogène en conduite automobile lors de longs trajets (Pottier 2000). Une privation de sommeil de 24 h interagit avec l'horaire du jour pour détériorer la performance de conduite surtout la nuit, avec une augmentation de la vitesse et du nombre des déviations latérales (temps de réaction allongé) (Figure 4) (Lenne et al. 1998).

Le tiers du public adulte américain est significativement somnolent dans le score ESS : « (défini au chapitre 2- § 5) ». Il existe une corrélation positive entre un score ESS élevé et accidents (NHTSA 1999) et (Maycock 1996). Le style de vie personnel (activité nocturne...) et le travail supplémentaire sont à l'origine d'un déficit de sommeil et de somnolence au volant (Mitler et al. 1988), (Mc Cartt et al. 1996) et (NCSDR/NHTSA 1999).

Figure 4 : Modification du temps de réaction en fonction de la durée du sommeil et de celle de la tâche (NHTSA 1999)



2. La désynchronisation

La désynchronisation telle que réalisée dans le travail posté, les voyages transméridiens et les courses transatlantiques est à l'origine de troubles de sommeil de type incapacité de s'endormir et / ou de se tenir éveillé au moment souhaité, de l'humeur

et de fatigue avec une baisse de la vigilance et risque accru d'accidents (Taillard et Mouret 1991) et (Lagarde 2000).

3. Les maladies de sommeil

Les maladies de sommeil comme les syndromes d'apnées du sommeil et la narcolepsie sont responsables d'une somnolence diurne qui augmente le risque d'accidents. Les hypersomniaques prouvent des performances de conduite médiocres et présentent un nombre d'erreurs de conduite significativement plus grand que les sujets sains ou ayant absorbé de l'alcool à 0.08 g dans le sang : sorties de route, franchissement de la ligne médiane ou latérale, non-respect de la signalisation routière (Findley et al. 1989 et 1995), (Haraldson et al. 1990) et (Montplaisir et al. 1995), (George et al. 1987), (Aldrich 1989), (Alpert et al. 1992) et (Broughton et al. 1981 et 1984).

Les maladies de sommeil sont associées à un risque d'endormissement au volant et d'accidents 5 fois plus élevés que dans la population générale. La somnolence diurne qui en résulte, est en cause dans 28 % des accidents de la voie publique et elle touche 20 % de la population générale en France (Prevot et Leger 2000) et (Leger et al. 1995).

Les sujets traités montrent tous une amélioration de leur performance. Les malades non traités qui prennent leurs précautions ont moins de risque que ceux inconscients de leur somnolence (Aldrich 1989), (Smiley et al. 1995) et (Haraldson et al. 1995).

L'ingestion d'alcool

Les recherches sur les effets de la prise d'alcool sur la vigilance des conducteurs ont montré qu'il existe une augmentation significative du risque de collision avec le taux d'alcoolémie. A alcoolémie égale, le risque d'accidents apparaît plus important chez les jeunes conducteurs (Simpson 1995) et (Vingilis 1995).

L'alcool est en cause dans 30 % des accidents mortels en France entraînant la responsabilité du conducteur, et 45 % avec un seul véhicule (Chabrol 2000). La consommation d'alcool est à l'origine de 20 % des accidents sur véhicule isolé consécutifs à une somnolence au volant. 1/3 des conducteurs accidentés par somnolence au volant, déclarent avoir bu avant la conduite (Wan, Knippling et Goodman 1996) et (Mc Cartt et al. 1996).

L'état alcoolique des conducteurs accidentés est souvent sous estimé par l'état clinique (dans 23% des cas) surtout chez les alcooliques chroniques qui ont une meilleure tolérance (Ducluzeau. et al. 1995).

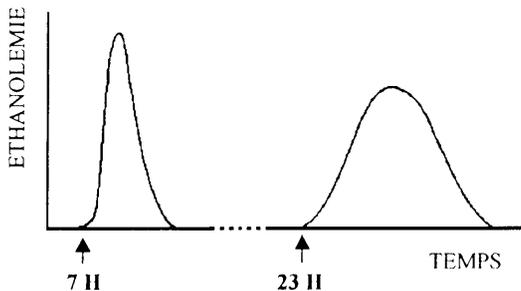
L'alcool interagit avec le rythme circadien pour aggraver la somnolence la nuit et l'après-midi. De ce fait, boire de l'alcool avant de conduire l'après-midi ou la nuit entraîne un risque particulier (Roehrs et al. 1994), (Horne et Baumber 1991) et (Horne et Gibbons 1991).

La consommation d'alcool associée à une restriction du sommeil augmente la détérioration de la performance de conduite et élève le risque d'accidents. A un taux d'alcoolémie égal, le nombre d'écarts latéraux sur la route est 4 fois plus important après

8 h de sommeil et 15 fois après 4 h de sommeil (Roehrs et al. 1994), (Wilkinson 1968) et (Huntley et Centybear 1974).

A partir des données de la chronobiologie, on retient que suite à une ingestion d'alcool à 23 h, l'alcoolémie croît plus lentement, atteint une valeur maximale moins élevée et décroît plus lentement que lorsque l'ingestion a lieu à 7 h (Figure 5). Un conducteur peut donc être en état d'infraction après une ingestion matinale d'alcool et ne pas l'être à la suite de l'absorption d'une quantité identique le soir (Caston 1993).

Figure 5 : Variation circadienne de l'alcoolémie après une ingestion d'alcool à 7 h et à 23 h (Caston 1993)



Bien que l'âge et l'intoxication alcoolique affectent la performance de conduite, Quillian et al. (1999) ne trouvent pas de différence entre les sujets âgés (> 60 ans) et les jeunes adultes (30-50 ans) en termes de sensibilité à l'effet de l'alcool et de performance de conduite.

Schepens et al. (1998) suggèrent que tester l'alcoolémie seule chez les conducteurs est insuffisant car il a trouvé 47,9 % tests positifs pour l'alcool ou la médication chez 211 conducteurs accidentés pendant les week-ends de 1994 – 1995 (35.5% alcool seul, 6.6 % médication seule et 5.7 % alcool et médication). 8 % ont un taux d'alcoolémie < 80 mg/dl, 25.3 % entre 150-190 mg/dl et 39 % = 200 mg/dl. 1/5 des 100 accidents mortels sur 1991-1996 sont attribués à l'alcool ou aux médicaments (Liu et al. 1998).

La prise de médicaments psychotropes

Les anxiolytiques benzodiazépiniques, les sédatifs antihistaminiques (anti H1) et les antidépresseurs tricycliques sont des médicaments psychotropes qui augmentent le risque d'accidents secondaires à la somnolence (Kozena et al. 1995), (Ceutel 1995), (Ray et al. 1992), (Leveille et al. 1994), (Van Laar et al. 1995) et (Gengo et Manning 1990).

Les psychotropes sont à l'origine de 10% des victimes des accidents de la route en Europe : 5 000 décès et 150 000 blessés chaque année (De Degier 1995). Le risque est plus important en cas d'association médicamenteuse et chez les jeunes conducteurs de sexe masculin (Ceutel 1995) et (Ray 1992).

Le zolpidem est un hypnotique à effet sédatif prédominant qui provoque 12 h après son absorption une altération significative des variables vitesse et position latérale sur simulateur de conduite (Etard et al. 1995) et (Billard 2000).

L'âge avancé

On observe chez les sujets âgés une réduction des capacités visuelles et auditives, un ralentissement du traitement de l'information et de l'exécution des réponses motrices et une réduction des capacités attentionnelles (Joly et Brower 1995). Parmi 174 conducteurs âgés (55-90 ans) observés sur la période 1985-1991, 19 ont été responsables de 1 à 7 accidents sur cette période.

La réduction du champs visuel en était la cause dans 40 % des cas (Sims et al. 1998). Le glaucome, les antidépresseurs et la longue durée de conduite sont les principaux facteurs de risque des accidents chez les conducteurs âgés mâles (HU PS 1998). L'altération cognitive est à l'origine de 65% des accidents de la route chez les conducteurs âgés (Lundberg 1998).

Autres causes d'accidents par hypovigilance du conducteur

1. Les facteurs d'ambiance

Une étude des effets synergiques du bruit, des vibrations et de la chaleur sur la vigilance du conducteur a montré que (Petit et TARRIER 1991) :

La chaleur exerce un effet négatif sur le niveau de vigilance et le temps de réponse et accroît le nombre d'erreurs de conduite.

Le bruit ne dégrade pas le niveau de vigilance et améliore les performances de conduite.

L'association bruit – vibrations diminue les effets négatifs des vibrations seules sur les tâches de performance.

L'association vibrations-bruit-chaleur va toujours dans le sens d'une dégradation de la vigilance.

2. Le facteur circadien

Il entraîne une somnolence au volant l'après-midi et la nuit même en l'absence de privation de sommeil (Dinges 1995).

3. Le pattern de conduite

L'heure du jour et la longue durée de conduite (> 3 h) sans arrêt augmentent le risque d'accidents surtout tard la nuit, conformément au pic circadien de somnolence (Mc Cartt et al. 1996), (Maycock 1996) et (Muzet 2000).

4. L'inattention

parler au téléphone en conduisant est associé à un risque élevé d'accidents automobiles. Le portable au volant multiplie les risques d'accidents par quatre (Chabrol 2000) et (Redelmeier et Tibshirani 1997)

Population à haut risque

La population à haut risque est constituée des jeunes conducteurs de sexe masculin, des travailleurs postés et des sujets atteints de maladies du sommeil non traitées.

Les jeunes conducteurs

Les conducteurs âgés de 16 à 29 ans, avec un pic à 20 ans, courent 4 fois plus de risque que ceux âgés de plus de 30 ans. Les adolescents sont plus exposés à la somnolence du fait de la perturbation circadienne de leur pattern de sommeil et de leur style de vie particulier (activités nocturnes) (Pack et al. 1995), (NSCDR/NHTSA 1999), (Maycock 1996), (Carskadon 1990), (Knipling et Wang 1994) et (Chabrol 2000).

Les jeunes conducteurs (âge < 30 ans) sont à l'origine de 2/3 des accidents secondaires à la somnolence au volant. Ils sont responsables de 35 % des accidents de la route entre 1989-1992. Ils constituent deux groupes de risque : ceux qui inexpérimentés et ivres conduisent sur route unique, et ceux qui roulent tard la nuit après une ingestion d'alcool (Knipling et Wang 1995), (Ryan et al. 1998), (Liu et al. 1998) et (Dussault 2000).

Parmi 109 décès consécutifs à 100 accidents de la route entre 1991-1996, 76 ont concerné des jeunes conducteurs (15-19 ans) dont 2/3 sont des garçons. Les hommes sont 5 fois plus incriminés que les femmes (Wang, Knipling et Goodman 1996) et (Liu et al. 1998).

Les travailleurs postés

Les travailleurs de nuit ont un déficit de sommeil de 1h 30 mn par rapport à ceux du jour. Le maximum de risque d'accident se voit chez les travailleurs de minuit à 8h du matin (Kessler 1992).

La privation chronique de sommeil et la désynchronisation qui en résultent sont responsables des troubles de la vigilance, des erreurs d'attention, de la baisse de la performance et de l'augmentation du temps de réaction ce qui augmente la fréquence des accidents (Dinges 1987), (Hamilton et al. 1972) et (Winget et al. 1984).

Le travail de nuit, posté ou supplémentaire est à l'origine de près de la moitié des accidents attribués à la somnolence au volant. 50 % des conducteurs accidentés rapportent avoir un travail posté ou supplémentaire avant l'incident (Mc Cartt et al. 1996) et (NSCDR/NHTSA 1999).

95 % des infirmières de nuit (12 h de travail) et 25 % des internes (24 h ou plus de travail) sont victimes d'accidents ou presque accidents pendant leur retour à la maison (Novak et Auvil-Novak 1996).

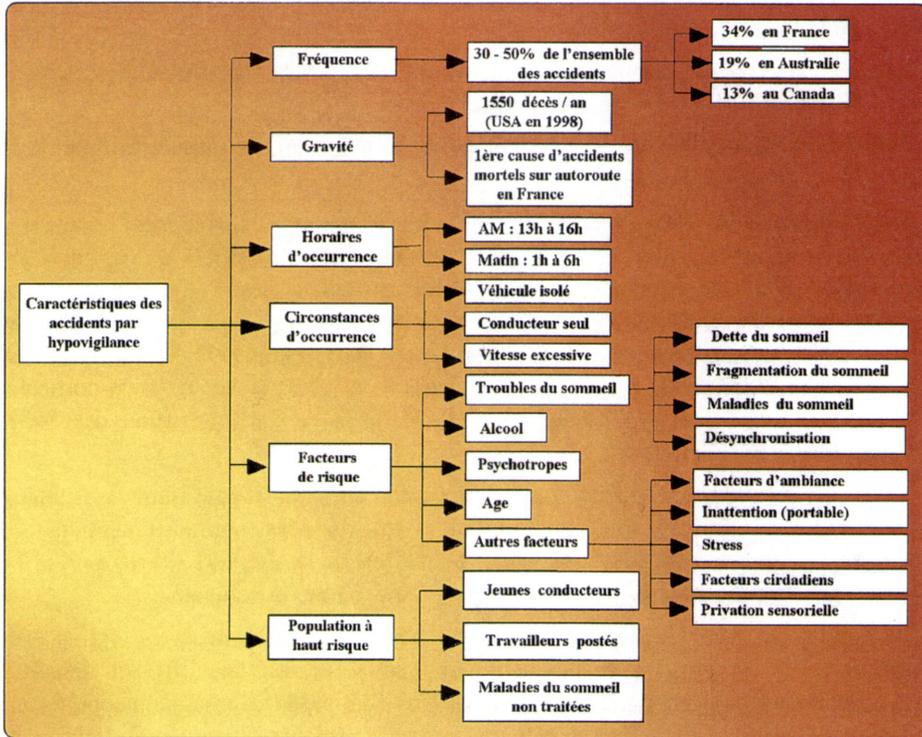
Les sujets souffrant d'une maladie du sommeil non traitée

Les conducteurs présentant une pathologie du sommeil sont plus exposés aux accidents par hypovigilance.

Le risque couru par les narcoleptiques est plus important que par ceux souffrants de syndrome d'apnées du sommeil, mais les premiers sont beaucoup moins nombreux (Aldrich 1989).

L'ensemble des différentes caractéristiques des accidents routiers par somnolence au volant sont synthétisées dans la figure 6.

Figure 6 : Caractéristiques des accidents par hypovigilance du conducteur (Hadj-Mabrouk et al. 2001)



Ces constatations ont poussé à développer des méthodes de détection des hypovigilances du conducteur afin de les prévenir, de garantir une vigilance optimale au volant et d'améliorer la sécurité routière.

Moyens de détection des hypovigilances et de prévention du risque d'accidents

L'accroissement du nombre d'accidents dus à l'hypovigilance ou à l'endormissement au volant et l'importance des dégâts humains et socio-économiques ont motivé l'étude de systèmes de détection de baisse de vigilance au volant en vue de faire prendre conscience au conducteur de son état et de prévenir le risque d'accident. Ces systèmes de détections développés se basent sur l'analyse d'indices objectivant l'état du conducteur ou de

paramètres en rapport avec la conduite (relevés sur le véhicule) ou la combinaison des deux (Hadj-Mabrouk et al. 2001).

Systèmes de détection des hypovigilances

Les moyens proposés pour étudier la vigilance et détecter une somnolence au volant sont de trois types selon que l'on observe (Hadj-Mabrouk 1999) :

L'état du conducteur : électro-encéphalogramme (EEG), électro-oculogramme (EOG), analyse de la posture, etc.

Les manœuvres effectuées par le conducteur : fréquence et amplitude des coups de volant, des coups de frein ou d'accélérateur, etc.

Le comportement du véhicule, et notamment sa position par rapport à l'axe de la voie : vidéo, bandes sonores, etc.

Les systèmes de détection développés sont basés sur l'analyse des paramètres électrophysiologiques (EEG et EOG). Le rythme alpha de l'EEG est sensible aux changements d'état de vigilance moyenne, il est caractéristique d'un état de vigilance dégradé. Alors que les rythmes thêta et delta sont nécessaires pour distinguer les plus faibles niveaux de vigilance, c'est-à-dire le sommeil (Sauvignon 1992). Les mouvements oculaires lents (MOL) sont révélateurs des baisses initiales de la vigilance corticale. L'index d'hypovigilance est fonction du rythme alpha et de l'apparition des MOL (Berrichi et al. 1991 et 1995).

Le principe de ces méthodes consiste à établir une corrélation entre les signaux physiologiques indiquant une hypovigilance, les données comportementales du conducteur (temps de fermeture des yeux, inclinaison de la tête vers l'arrière...) et les indices cinématiques (angles du volant, vitesse et trajectoire du véhicule...).

Planque et al. (1995) ont établi une référence physiologique du niveau de vigilance en situation réelle de conduite et une corrélation entre les résultats EEG et l'analyse comportementale grâce à l'analyse simultanée d'un film vidéo du visage du conducteur, de l'angle du volant et de la vitesse et la trajectoire de véhicule. Chaput et al. (1991) ont montré que les fonctions *volant* sont capables de discriminer deux niveaux d'éveil différents.

D'autres auteurs ont développé un modèle de détection et de prédiction automatique des fluctuations fines de la vigilance en situations réelles de conduite grâce à un dispositif électronique adapté à un système de lunettes. Ce procédé a montré que le nombre de pics d'hypovigilance est significativement plus élevé lors de la deuxième période d'un long parcours. Khardi et al. (1995) ont objectivé une relaxation physiologique des conducteurs et une décélération spontanée du véhicule en cas de conduite prolongée sur un trajet autoroutier de six heures.

Brookhuis (1995) a élaboré un projet appelé *DETER* ayant pour objectif d'évaluer et de contrôler les performances du conducteur sur simulateur de conduite et en situation réelle de conduite. Il collecte les données de conduite (fonction «volant») et des paramètres EEG du conducteur. Il établit les caractéristiques d'une conduite normale et

d'une conduite dans un état dégradé (hypovigilance). Le diagnostic est basé sur le comptage des erreurs commises, les retards réactionnels et les variations des modes opératoires utilisés. Ces modèles de conduite normale ou dégradée sont stockés et servent de base de référence. Grâce à un système qui collecte et analyse instantanément des données de conduite, on peut diagnostiquer une conduite normale et un dysfonctionnement de conduite. Une alarme est déclenchée automatiquement au passage d'une conduite normale à une conduite dégradée (Chan et Herrera 1995).

Wylie (1995) ayant utilisé les mêmes moyens et les mêmes principes présente une large base de données concernant l'étude de la vigilance des conducteurs de camions. Il a enregistré 483 périodes de sommeil principal chez les conducteurs qui ont effectué une tâche secondaire au cours des trajets (tâche de poursuite ou de vigilance psychomotrice, une épreuve de substitution de code).

L'étude de la posture corporelle, comme indicateur de la fatigue, en correspondance avec les signaux physiologiques du conducteur (EEG, EOG) a conclu à une interaction significative entre la position de la tête et l'état de vigilance. Une inclinaison de la tête vers l'arrière indique une vigilance basse (Fakhar et al. 1991).

Muzet et Clot (1995) ont réalisé un poste d'analyse de la vigilance en conduite automobile simulée *PAVCAS*. Ce poste apprécie les capacités réactionnelles et le comportement d'un conducteur placé dans différentes situations de conduite. Il prend en compte les facteurs individuels (âge, motivation, expérience de conduite) et les divers facteurs situationnels (le moment du jour, la fatigue, la privation de sommeil, la prise médicamenteuse). L'application essentielle de ce poste est la mise au point d'un système destiné à avertir le pilote en situation de conduite dégradée et à provoquer, le cas échéant, l'arrêt automatique du véhicule.

Peltier et Dubisson (1995) présentent un système de diagnostic du comportement du conducteur qui met en œuvre un paramètre physiologique (EEG) et qui détecte l'hypovigilance par analyse de l'évolution de son activité de conduite. C'est une méthode adaptative qui tient compte de la spécificité du conducteur (variabilité intra-individuelle des manifestations de l'hypovigilance). Ce système capable d'auto-apprentissage détermine d'abord l'évolution de l'activité de conduite en conditions normales et détecte ensuite d'éventuelles hypovigilances. Les auteurs ont conclu qu'un état d'hypovigilance peut avoir des manifestations différentes sur l'activité de conduite et qu'hypovigilance physiologique et altérations des performances de conduite ne sont pas nécessairement simultanées.

Khardi et Hernandez-Gress (2000) ont validé un nouveau système hybride de diagnostic, en temps réel, de l'état de vigilance du conducteur en conduite réelle. C'est un système développé en 1998 au sein du projet européen *SAVE* (System for effective assesement of the driver state and vehicle control in emergency situation). Il est constitué de plusieurs capteurs complémentaires associés à des méthodes d'apprentissage, de diagnostic et de décision en ligne (traitement des données). La validation de ce système consiste à comparer les baisses de vigilance identifiées et validées par les critères physiologiques et les résultats fournis par le système de diagnostic en temps réel. Les performances estimées de ce système donnent une sensibilité et une spécificité de l'ordre de 94 % et 99,4 % respectivement. Ils ont conclu

à des niveaux accidentogènes (vigilance dégradée) et hypovigilants dans des proportions moyennes respectivement de 31 % et 69 % des baisses de vigilance des conducteurs. La durée moyenne totale de l'hypovigilance est égale à 10,2 minutes (8,5 % de la durée de conduite). L'apport de ce système ne se limite pas à détecter une dégradation de l'état du conducteur. En effet, il est capable également, d'en établir la cause, d'en évaluer la sévérité, d'alerter le conducteur et de déclencher, si besoin, l'arrêt automatique du véhicule sur le bord de la chaussée.

Cependant tous ces systèmes, encore en cours d'étude ou de développement, n'ont pour l'instant pas été intégrés car ils ne se sont pas révélés fiables ni acceptables par les conducteurs (Khardi et Hernandez-Gress 2000).

Mesures de prévention des hypovigilances

Les différentes mesures proposées pour pallier à l'hypovigilance au volant sont orientées vers l'amélioration de l'état du conducteur et vers l'équipement du véhicule de systèmes d'aide au maintien de la vigilance qui déclenchent une alarme en cas de baisse de vigilance du conducteur lors de la conduite (Hadj-Mabrouk 1999).

Chich (1991) propose des suggestions qui soulignent l'aspect multidimensionnel du maintien de la vigilance du conducteur :

Eviter les situations à risque par l'organisation du travail ; l'éducation en vue d'une meilleure hygiène de vie et la structuration de la tâche par action sur l'environnement, le poste de conduite...

Evaluer l'adéquation des caractéristiques de l'opérateur aux exigences de la tâche.

Mettre en place de processus d'alerte efficaces et acceptés par l'opérateur.

Evaluer les potentialités de la pharmacologie dans ce domaine.

1. Les interventions comportementales

Les interventions comportementales ont pour but d'éviter les facteurs de risque de somnolence et consistent à :

1.1. Minimiser les effets d'une dette de sommeil

Ainsi des siestes de courtes durées (15-20 mn) avant les longs trajets ou lorsque le conducteur est somnolent augmentent la performance plusieurs heures après même en situation de privation de sommeil ((Dinges 1987, 1992 et 1995), (Horne et Reyner 1995a), (Lorist 1994), (Lumley 1987), (Philipp et al. 1997) et (Regina et al. 1974).

En cas de privation de sommeil, des siestes de quelques minutes (20-40) à quelques heures (2-3 h) judicieusement placées préviennent les perturbations des capacités psychophysiologiques secondaires à l'éveil prolongé, font diminuer la somnolence et ramènent la performance à son niveau basal (Roussel 1991) et (Gilbert 1996).

Un repos durant la nuit avec une alternance de deux conducteurs paraît la stratégie la plus réussie pour surmonter la fatigue des conducteurs de camion durant le voyage de long trajet (Feyer et Meril 1997).

1.2. Aménager les horaires du travail

La gestion des horaires du travail consiste à ajuster le travail au changement du rythme circadien, à faciliter les siestes pour les travailleurs de nuit et à ne pas dépasser 8h de travail. L'extension du travail à 12h par jour est une source d'augmentation de fatigue pendant le travail et de détérioration de la performance et de la sécurité.

Travailler 12 h par jour 4 fois par semaine augmente plus le risque d'accidents que lorsqu'on travaille 8 h par jour 6 fois par semaine (Brown 1994), (Vidacek et al. 1994), (Harma 1993), (Dinges 1992) et (Naitoh 1992).

Le nombre d'heures de travail à partir duquel peut apparaître une diminution d'efficacité dépend de la nature de la tâche et de ses conditions d'exécution (Gadbois 1990).

Un cycle de travail-repos conforme au rythme circadien améliore le sommeil et la performance (NCSDR / NHTSA 1999).

Caston (1993) propose deux méthodes pour minimiser les effets du travail posté sur les rythmes circadiens :

Modifier la période de rotation : une rotation tous les 3-4 jours entraînerait des troubles moins importants, et une rotation tous les 1-2 jours n'entraînerait pas de troubles du tout.

Modifier le nombre de jours de repos qui suit chaque période de travail de nuit : des périodes de repos plus longues et moins fréquentes donneraient une meilleure adaptation et récupération que des périodes plus courtes et fréquentes.

1.3. Utiliser des substances éveillantes

Boire deux cafés a un effet positif durant une heure augmente la performance sur simulateur de conduite et diminue le risque potentiel d'accidents (Griffithis 1990).

La caféine à dose de 300 mg/j améliore la performance pour des tâches d'attention soutenue, de raisonnement logique et de mémoire. Elle augmente la latence à l'endormissement (vigilance) et la performance de vérification (Smith et al. 1992) et (Zwyghuizen-Doorenbos et al. 1990).

Le modafinil est un médicament intéressant dépourvu d'effets toxicomanogènes et de retentissement sur le comportement (comparativement à la caféine et aux amphétamines) (Roussel 1995).

1.4. Améliorer l'hygiène de vie

Eviter la consommation d'alcool et la conduite surtout pendant la période de minuit à 6 h du matin où la somnolence est habituelle diminue le risque d'accident (Mitler et al. 1988) et (Brown 1994).

Une activité physique modérée pratiquée régulièrement améliore le rythme veille/sommeil. Le sommeil nocturne paraît moins fragmenté et la vigilance diurne au cours d'une tâche de conduite automobile sur simulateur est améliorée (Gruau et al. 2000).

Selon Tiberge (in Chabrol 2000) « *Quoi qu'on fasse – augmenter le volume de la radio, allumer une cigarette, ouvrir la fenêtre – le sommeil l'emportera dans tous les cas... Le seul conseil qu'on puisse donner, c'est de s'arrêter dès que l'on perçoit l'un de ces signes pour éviter l'accident* ».

Prévenir la somnolence par un sommeil adéquat avant la conduite est plus facile et efficace que d'autres mesures (NCSDR / NHTSA 1999). Le traitement des sujets souffrant de pathologies du sommeil est un remède considérable.

2. Les interventions instrumentales

Elles consistent à élaborer des dispositifs d'aide au maintien de la vigilance. Ce sont des systèmes embarqués dans le véhicule qui détectent de façon continue et non invasive la perte d'attention du conducteur et déclenchent un signal d'alarme visuel ou auditif pouvant conserver voire augmenter le niveau de vigilance du conducteur (Knippling et Walter 1995), (Labiale 1991), (Mackier et Wylie 1991) et (Malaterre et Fontaine 1991).

Des moniteurs de fatigue ont été développés : moniteur de fermeture des yeux qui émet une alarme audible lorsqu'elle dépasse 0.5 seconde, dispositif de mesure du temps de réaction à un signal visuel d'alarme de fatigue et moniteur de signal de la tête qui bourdonne lorsque la tête dépasse un angle de flexion prédéterminé (Haworth et Volcan 1991). L'efficacité de ces moniteurs est réduite car ils n'ont pas d'effets sur le maintien de la vigilance ni sur la prévention d'une détérioration de la performance. Ces dispositifs peuvent même donner une fausse sécurité au conducteur et l'empêchent de prendre les mesures comportementales appropriées pour éviter la somnolence (Haworth et Volcan 1991), (Horne et Reyner 1995a), (Dinges 1995) et (NCSDR/NHTSA 1999).

Les dispositifs d'alerte de type « bande sonore » paraissent plus efficaces. Ce sont des marquages en relief posés sur la chaussée et sonores au passage des roues ; ils éveillent le conducteur somnolent avant de quitter la route et indiquent qu'il n'est pas en état de conduite sécurisante. (Boussuge et Lafont 1995), (Garder et Alexander 1995) et (NCSDR/NHTSA 1999).

D'autres classes de dispositifs sont destinées non seulement à détecter l'hypovigilance et à avertir automatiquement le pilote en cas de conduite « anormale » mais aussi à provoquer, le cas échéant, l'arrêt automatique du véhicule (Malaterre et Fontaine 1991) et (Khardi et Hernandez-Gress 2000).

Outre ces dispositifs de détection de la somnolence du conducteur, il existe des systèmes dits « intelligents » d'aide à la conduite qui méritent d'être signalés. Ce sont des moyens destinés à assister le conducteur dans sa tâche de conduite et à modifier ses comportements dangereux, d'insécurité ou critiques. Ils ne déclenchent pas une alarme en cas de baisse de vigilance, mais en cas de dépassement de vitesse (limiteur de vitesse) ou d'obstacle trop rapproché (radar anticollision).

Le limiteur de vitesse ou ACC (Adaptive Cruise Control) est un système de régulation intelligente de la vitesse du véhicule mis au point par Renault. Il est capable de moduler de lui-même une vitesse de croisière (choisie par le conducteur) en tenant compte de la vitesse et de la distance du véhicule qui précède. Il prend en charge les actions d'accélération, de décélération et de rétrogradation pour assister le conducteur dans la

gestion des vitesses et des marges intervéhiculaires, mais le conducteur peut reprendre la main à tout moment. Lorsque ces marges excèdent un certain seuil jugé critique, une décélération est réalisée (Saad et Villame 1997).

Le radar anti-collision est un dispositif embarqué qui détecte à temps tous types d'obstacles, notamment par mauvaise visibilité, et qui peut fournir différentes alarmes, visuelles (p.ex ; à l'aide des diodes lumineuses vertes, jaunes et rouges), ou sonores, incitant le conducteur à ralentir pour éviter le danger (Malaterre et Saad 1986).

Néanmoins, l'aide fournie par le radar anti-collision ne recouvre pas la totalité des situations où le conducteur pense avoir besoin d'une aide. En outre, la fiabilité de ce dispositif est limitée car il fournit parfois des alarmes non conformes, inutiles, tardives ou fausses. La non-conformité du dispositif réside principalement dans la non prise en compte du type de circulation et d'infrastructure (situations ou conditions de conduite), du type de tâches de conduite à assister (caractéristiques, exigences) et surtout des comportements et des variables individuelles caractérisant le conducteur.

Pour apporter un élément de réponse à ces lacunes, Summala (2000) propose une aide adaptative individualisée qui adapte la voiture intelligente au style de conduite réel du conducteur sur un continuum de conduite défensive/agressive. Il trouve qu'il est indispensable de rechercher une variable générale de contrôle qui sert de base à la fois pour une théorie générale du comportement du conducteur et pour des solutions pratiques ou techniques de conception du système routier et de véhicules intelligents. Car un système adéquat d'aide au conducteur doit s'appuyer sur un modèle de conduite de référence auquel on compare le comportement réel du conducteur.

Fuller (2000) propose un modèle d'interface tâche-capacité du processus de conduite qui vise à apporter des données de la situation de conduite à différents moments. Ce modèle détermine les conditions dans lesquelles les exigences de la tâche nécessaires à la sécurité du déplacement ont temporairement dépassé les capacités du conducteur. C'est un modèle qui essaie d'intégrer, dans un cadre conceptuel plus large, les facteurs cognitifs, humains, motivationnels, sociaux et les facteurs liés au véhicule et à l'environnement.

Fuller (2000) trouve que la lacune la plus flagrante en matière de formation et d'évaluation de la conduite à l'heure actuelle est l'absence d'apprentissage systématique des symptômes et des effets des variables liées aux facteurs humains (fatigue, somnolence, drogues, alcool, niveau d'éveil, etc.) ou de la manière d'y faire face.

Conclusion

Les notions de chronobiologie ont permis d'éclairer certains aspects des accidents et leur prise en considération dans le domaine des transports routiers est nécessaire pour réduire le niveau de risque et améliorer par conséquent la sécurité.

Toutes les études menées sur les accidents de la route soulignent la place de la baisse de vigilance dans la genèse des accidents. Les principales causes des accidents par somnolence au volant sont les troubles du sommeil, les pathologies du sommeil, l'ingestion d'alcool et la prise des médicaments psychotropes.

D'autres travaux ont mis l'accent sur les conséquences de l'altération de la vigilance, l'analyse des caractéristiques des accidents par hypovigilance, les facteurs favorisant l'endormissement au volant, les moyens de détection de l'hypovigilance du conducteur et les mesures de prévention du risque d'accident.

Malgré l'apport indéniable de ces dispositifs au maintien de la vigilance, la prévention de la somnolence au volant par un sommeil adéquat avant la conduite reste le moyen le plus facile et le plus efficace et contribue à l'amélioration de la sécurité routière.

Chapitre 4

Facteurs Humains et sécurité des systèmes de transports ferroviaires

L'étude de la vigilance et des effets de sa dégradation sur les performances est intégrée dans le cadre plus large de « facteur humain ». L'hypovigilance est une cause d'erreur humaine parmi d'autres dans le domaine des transports ferroviaires.

Les transports ferroviaires impliquent plusieurs opérateurs responsables de la bonne marche et de la sécurité des systèmes de transports. Ces opérateurs sont surtout les agents de maintenance et les agents d'exploitation (contrôleurs au Poste de Contrôle – Commande – PCC et les agents de conduite). Ces opérateurs sont soumis à des rythmes de rotation horaire variables pouvant être à l'origine d'une tolérance plus ou moins bonne au travail posté du fait d'une désynchronisation interne de l'individu, souvent constatée chez les travailleurs postés d'autres domaines. La non concordance des horaires de travail avec les horaires de meilleure forme et des pics de vigilance, impose un effort supplémentaire d'adaptation à ces horaires, augmentant ainsi la charge du travail et pouvant affecter la fiabilité de ces opérateurs (Dogui 1998).

Très peu d'études ont été consacrées aux notions spécifiques de chronobiologie de la vigilance dans ce domaine. Avant d'aborder ces aspects, certaines notions classiques mais importantes méritent d'être exposées

Les contraintes du métier

Les contraintes du métier dans ce domaine sont loin d'être stables, elles sont devenues plus nerveuses que physiques. Les exigences de la tâche de conduite augmentent au niveau psychologique sur les plans cognitif et comportemental alors qu'elles diminuent au niveau physique. De ce fait, le problème de la fiabilité dans les systèmes Homme-Machine est celui de la compatibilité entre les variations de l'état fonctionnel de l'opérateur et celles des exigences du travail (Gadbois 1990) et (Macaire 1991).

La spécificité du métier du conducteur exige une réponse aux consignes de sécurité tout en prenant en compte la vigilance (importance des signaux d'alerte indiquant un dysfonctionnement de la machine ou de son environnement), les conditions d'environnement qui influent sur cette vigilance (ergonomie de la cabine, organisation du travail, médication...) et la détection de défaillance physique du conducteur (Masson 1991).

Les variations de la performance découlent de la rythmicité circadienne dont l'influence est modulée par les caractéristiques de la tâche (monotonie, absence d'intérêt), la place de l'activité de l'opérateur dans le système et les conditions dans

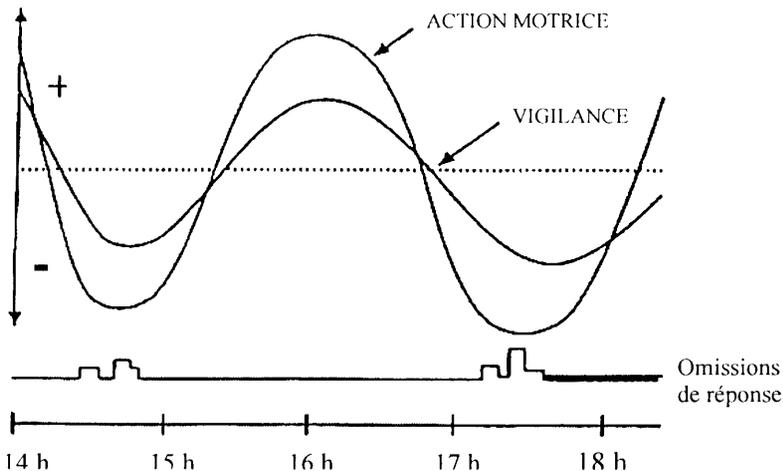
lesquelles se déroule cette activité (bruit, chaleur). Les incidences de ces variations sur la fiabilité ne sauraient être évaluées précisément sans que soit prise la mesure exacte du niveau des exigences de la tâche et de ses variations (Gadbois 1990).

Le nombre de nuits consécutives de travail peut avoir sur le plan de la fiabilité des incidences variant avec la nature des tâches et nécessitant de ce fait une évaluation spécifique. Un cycle de travail posté donné est susceptible d'induire, sur le seul plan chronobiologique, compte tenu des effets de désynchronisation, des modifications de l'état fonctionnel des opérateurs. Ces modifications de l'état fonctionnel peuvent ne plus être compatibles avec les exigences de la tâche, au cours de chacun des postes de travail successifs que définit cet horaire (Gadbois 1990).

Les variations circadiennes des capacités fonctionnelles de l'opérateur humain sont susceptibles de mettre en cause la fiabilité des systèmes Homme-Machine (Sauvignon 1992).

La monotonie de la tâche de conduite et les horaires décalés des services sont à l'origine d'une baisse de la vigilance associée à des dégradations de l'efficacité. L'attention des conducteurs de train tend à décliner après deux ou trois heures de conduite ininterrompue sans préjuger des raisons ou des mécanismes. La fatigue chez les conducteurs peut avoir son origine dans la monotonie due à une inaction prolongée combinée aux contraintes et dans le déficit du système informatif. L'hypovigilance en période monotone demeure le facteur essentiel de perte de contrôle et d'efficacité lors d'épreuve de conduite (Mollard 1991) (Figure 1).

Figure 1 : Schématisation du comportement du conducteur de train en situation monotone (Mollard 1991)



Les causes des accidents ferroviaires

Les incidents et accidents des transports ferroviaires mettant en cause la sécurité des circulations sont fréquemment dus à des facteurs humains, défaillance de l'opérateur humain ou erreur humaine (imprudance, maladresse, fausse manœuvre, alarme négligée, mauvaise transmission d'information, hypovigilance...) (Mollard et al. 1991) et (Masson 1991).

L'erreur humaine représente dans 70 à 90 % des cas la cause des accidents dans les transports terrestres, maritimes ou aériens. Ces accidents sont responsables de 47 900 morts aux USA en 1986 et 10 550 morts en France en 1988 (Roussel 1991)

Une étude bibliographique menée par l'INRETS a révélé que l'erreur humaine est en cause dans la majorité des accidents ferroviaires (Hadj-Mabrouk 1998) :

- La défaillance humaine est la cause de plus de 90 % des accidents dans les transports collectifs urbains ;
- La SNCF a montré que l'erreur humaine est à l'origine de 64 % des accidents ferroviaires (Malye F. 1995).
- L'erreur humaine était considérée comme cause première de 270 accidents sur 1283 dont 113 collisions et 67 déraillements. Il en est de même de 103 déraillements par an en moyenne sur 1971-75, de 72 en 1987, de 64 en 1988, de 28 en 1989 et de 43 en 1990 ;
- L'erreur humaine a été la cause d'une collision entre un train de marchandises et le Paris-Nice en gare de Melun le 17 octobre 1991 (16 morts) ;
- Les principales causes d'accidents à la SNCF proviennent de défaillances humaines lors de manœuvres de conduite de trains (100 franchissements de signaux d'arrêt par an, dont 25 avec engagement du point protégé en 1992 et 36 en 1993) ;

A la RATP les erreurs humaines (fausse manœuvre, alarme négligée, mauvaise transmission d'information...) sont directement à l'origine d'environ 65 % des défaillances d'un système et indirectement en cause dans pratiquement tous les cas restants. Une étude quantitative a montré que les accidents attribués à une erreur du conducteur concernent surtout le franchissement non réglementaire d'un signal fermé : 19 cas en moyenne par an (première ligne métro), 17 cas par an (deuxième ligne métro) et 10 cas par an (ligne RER) (Silhol D. et Tomezak J.-M. 1998).

L'erreur humaine liée à une baisse de la vigilance est devenue un élément critique dans la fiabilité du système Homme-Machine (Mollard et al. 1991).

Notions d'erreur humaine

Il existe plusieurs causes de la défaillance humaine : erreur humaine, incapacité humaine d'origine interne (maladie,...), incapacité humaine d'origine externe (perturbation des conditions de travail, formation insuffisante,...), etc. Le système « homme mort » sur les trains est un exemple type de précaution pour réduire les probabilités des incapacités humaines (Villemeur 1988).

Le terme *erreur humaine* est différemment défini selon les auteurs. Selon Reason (1990), ce terme a un sens générique, qui couvre tous les cas où une séquence planifiée d'activités mentales ou physiques ne parvient pas à ses fins désirées, et quand ces échecs ne peuvent pas être attribués à l'intervention du hasard.

Villemeur (1988) la définit comme une déviation par rapport à une action, à une séquence d'actions ou à une stratégie supposées optimales et servant de référence. Elle résulte de dysfonctionnements au niveau des activités sensorielles, mentales ou physiques de l'opérateur humain. Il s'agit d'un écart entre le comportement de l'opérateur et ce qu'il aurait dû être.

Selon Amalberti (1997), l'erreur est l'écart par rapport à une action, une séquence d'actions ou une stratégie servant de référence. Une erreur est susceptible de conduire à une défaillance. Une défaillance est un événement survenant lorsque le comportement du système s'écarte de la fonction attendue.

L'erreur peut s'interpréter comme une inadéquation entre les caractéristiques d'une situation et les limites du fonctionnement cognitif de l'homme. Elle n'est qu'un facteur parmi d'autres causes de catastrophes (Dekeyser 1989).

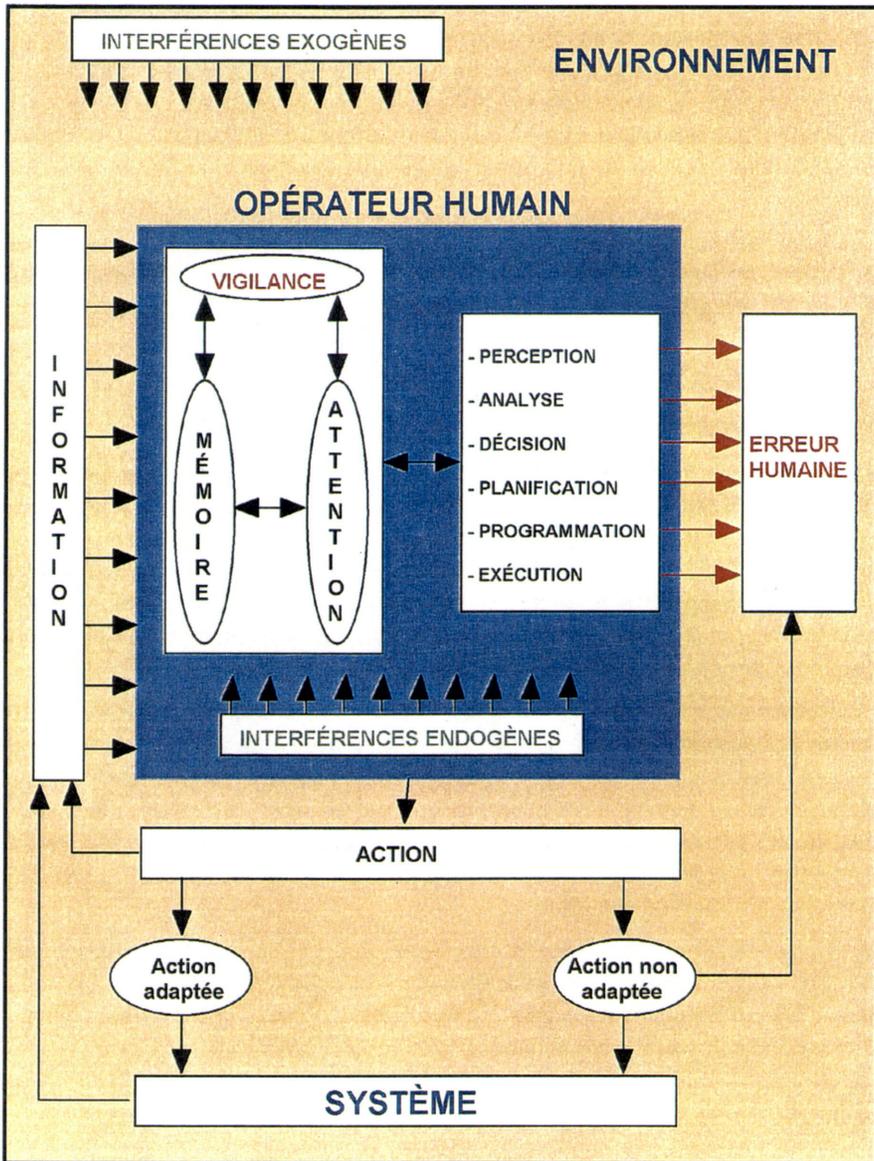
Grau et Amalberti (1995) classent les erreurs d'attention en 4 types : erreurs d'exécution survenant dans des tâches routinières et très automatisées, qualifiées de ratés ; erreurs d'inattention traduisant un oubli de contrôle pendant l'exécution du schéma d'action ; erreurs de surattention traduisant un contrôle attentionnel inopportun lors de l'exécution d'actions routinières et automatisées, fréquentes dans le pilotage ; et erreurs consécutives aux problèmes de représentation.

Reason (1990) a introduit une typologie des erreurs qui distingue deux types d'actions. (1) Les actions non voulues (ratés et lapsus) où l'intention d'agir correctement était présente. Les ratés sont des erreurs liées à l'exécution des actions. Les lapsus sont des erreurs liées à l'échec du stockage de l'information. (2) Les actions voulues (fautes) sont des erreurs de planification liées à des déficiences du jugement.

Quelle que soit la définition adoptée, l'erreur humaine traduit un dysfonctionnement au niveau de la chaîne des opérations mentales conduisant à l'action (Figure 2) (Hadj-Mabrouk et Dogui 1999).

Toutes ces constatations soulignent l'ampleur du problème posé par l'erreur humaine dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires. Le taux d'accidents par erreur humaine semble être constant depuis des années malgré une automatisation de plus en plus poussée. Peut – on considérer l'opérateur humain comme élément faillible ? Peut-on lui accorder une confiance totale ? Garde-t-il encore une place dans les systèmes de transports automatisés ? Le paragraphe suivant tente d'apporter des éléments de réponses à ces questions.

Figure 2 : Place de la vigilance dans le processus cognitif humain aboutissant à l'action (Hadj-Mabrouk et Dogui 1999)



L'homme a-t-il encore sa place dans les systèmes de transports automatisés ?

Le terme *automatisation* signifie le remplacement d'une fonction humaine, qu'elle soit manuelle ou cognitive, par une fonction automatique dont le rôle est d'aider l'OH à faire son travail. Elle est considérée comme un outil ou une ressource, un dispositif, une méthode ou un système permettant à l'homme d'accomplir une tâche qui serait difficile voire impossible à exécuter, ou qui demanderait davantage d'effort ou d'attention humaine.

Les automatismes sont simplement l'une des nombreuses ressources dont dispose l'OH, lequel est responsable de gérer et diriger le système dans son ensemble pour renforcer l'efficacité, accroître la fiabilité et la disponibilité et améliorer ainsi la sécurité (Cirulaire 249 OACI 1994).

Principales raisons et limites de l'automatisation

Les principaux motifs de l'automatisation découlent souvent des limites des capacités de l'OH. Elle assiste l'OH notamment dans les tâches de planification, de prévision du trafic, de contrôle de la circulation... On fait appel à l'automatisation lorsque la croissance du volume d'informations dépasse la capacité humaine de traitement, quand on a besoin de données plus exactes, précises, fiables et actuelles (position, vitesse...), pour offrir une grande précision de manœuvre, pour garantir le confort des passagers par exemple et respecter les horaires.

L'automatisation doit être généralement conçue pour coopérer avec l'OH et faciliter sa tâche. De ce fait, il ne faut pas confier, sans justification, aux OH les tâches pour lesquelles le concepteur éprouve des difficultés à automatiser. L'activité de l'OH ne doit pas être définie en partant des opérations qui ne peuvent pas être réalisées par les automatismes. Il faut donc étudier la collaboration entre l'homme et la machine à un stade très précoce (dès la spécification) de la mise au point du dispositif pour assurer l'efficacité et la sécurité du système.

Dans le domaine du transport aérien, l'approche de l'automatisation basée sur la technologie suscite plusieurs préoccupations classées en dix catégories dont la majorité s'applique à l'environnement de contrôle de la circulation et au poste de pilotage et ont trait notamment aux problèmes suivants (cirulaire 249 OACI 1994) :

- Perte de conscience de l'état des systèmes : OH ne connaît pas le fonctionnement ni les possibilités et les limites des systèmes automatisés.
- Conception inadéquate de l'interface : problèmes liés à la transmission des informations entre l'homme et la machine.
- Attitude envers l'automatisation qualifiée de mauvaise acceptation et d'insatisfaction devant le fonctionnement de systèmes automatisés dans un environnement non convivial.
- Problèmes de motivation et de satisfaction liée au travail : l'opérateur humain éprouve une impression de régression de sa compétence professionnelle.

- Confiance excessive dans les automatismes : il y a le risque que l'opérateur craint de prendre la relève des automatismes.
- Erreurs de décision systématiques : l'aptitude humaine à prendre les décisions optimales peut être limitée surtout dans les situations de stress.
- Ennui et relâchement de la vigilance de l'opérateur devant les automatismes si une grande partie du système est complètement automatisée. L'homme sera trop tolérant à des erreurs dans la performance du système automatisé.
- Intimidation devant les automatismes : l'opérateur hésite à intervenir dans le déroulement de processus automatisés, même si un dysfonctionnement est manifeste (lacunes de formation ou pression).
- Méfiance de l'opérateur lorsque le système ne fonctionne pas de la même façon que lui ou de la façon qu'il attend, ce qui peut conduire à une intervention humaine inopportune liée surtout à un manque d'entraînement.
- Charge de travail de l'opérateur accrue par des activités nouvelles telles que la saisie et la restitution des données.

En résumé, les principales limites de l'automatisation peuvent être scindées en deux classes : la première concerne les risques d'erreur dans la conception et la réalisation du système, la seconde est relative à la baisse de la fiabilité de l'OH consécutive à une automatisation poussée.

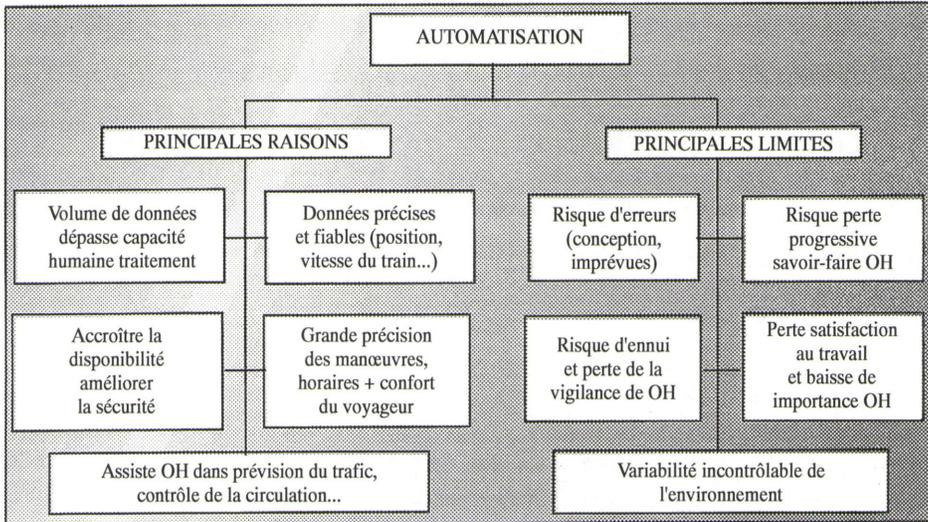
En effet, l'automatisation peut éviter des erreurs de manœuvre mais elle ne peut en aucun cas supprimer les erreurs de conception ou les erreurs imprévues. Les dispositifs conçus ne sont jamais fiables à cent pour cent et l'homme doit parfois reprendre la conduite du processus en manuel. L'automatisme ne serait fiable que dans des situations bien identifiées, et par conséquent les cas les plus difficiles qui n'auraient pas été prévus seraient laissés à la charge des opérateurs. Il apparaît difficile, techniquement et économiquement, de concevoir des dispositifs couvrant la totalité des configurations possibles (De Montmollin 1995). En outre, elle engendre des risques induits liés à une trop grande quantité d'informations à manipuler, à comprendre et à gérer.

D'autres part, l'automatisation risque de faire perdre progressivement le savoir-faire et l'expertise humaine, elle peut entraîner une perte partielle de la maîtrise des connaissances qui peut être néfaste lorsque l'opérateur doit reprendre la conduite en manuel. Elle risque également de supprimer des opérations quotidiennes qui servent de base à la construction progressive de la culture des opérateurs. Si le dispositif est toujours fiable et adéquat, l'homme risque de développer une excessive confiance en lui et d'accepter automatiquement les solutions proposées. En cas de défaillance de la machine, l'opérateur risque de devenir incapable de formuler une solution de rechange satisfaisante ou de proposer une solution inadéquate (Circulaire 241 OACI 1993).

De plus, l'OH perd le sentiment de sa propre importance avec absence de satisfaction au travail. En étant en charge d'une tâche mineure (sans intérêt), il risque de s'ennuyer et de s'endormir. La monotonie de la tâche et l'absence de stimuli sensoriels sont à la base d'une baisse de la vigilance de l'OH. L'erreur humaine liée à une somnolence de l'OH demeure la cause principale des accidents. La difficulté de prendre en compte la

variabilité incontrôlable de l'environnement représente aussi des limites considérables de l'automatisation.

Figure 3 : Synthèse des principales raisons et limites de l'automatisation



Principaux rôles de l'opérateur humain dans les transports automatisés

Selon Terssac et Chabaud (1990), la nécessité de l'intervention humaine est liée à l'incomplétude partielle des automatismes et à leur incohérence relative au regard du contexte réel de travail. L'automatisation étant un processus complexe ne fonctionnant pas de façon continue et autonome, l'opérateur humain est sollicité pour gérer les événements non prévus, la dynamique temporelle du processus et la coordination des tâches.

Le rôle essentiel de l'homme dans les systèmes automatisés consiste à vérifier la pertinence des procédures et à les coordonner pour une exécution particulière, dans un contexte donné et dans l'éventualité d'une incohérence ou d'une incompatibilité des procédures avec le contexte de travail. Il consiste aussi à prévenir les conflits potentiels dans le couplage hommes-travail à faire ou bien à récupérer ces dysfonctionnements en développant des actions de correction visant à les éliminer ou à diminuer leurs conséquences sur l'obtention des résultats.

Même dans les systèmes totalement automatiques, des opérateurs au poste de contrôle/commande (pcc) et des agents de conduite (adc) continuent à œuvrer. Ces derniers peuvent également jouer un rôle dans des situations dégradées, après une défaillance des automatismes par exemple. Dans de nombreux systèmes non complètement automatisés, un conducteur cohabite en cabine de conduite avec des aides à la conduite de nature diverse. Il est donc indispensable de prendre en compte la

présence de ces opérateurs humains dans les analyses de sécurité (David et al. 1994) et (Hadj-Mabrouk 1996a).

Néanmoins, la tendance actuelle des exploitants est de ne plus accorder une confiance totale aux opérateurs. En effet, ils sont considérés comme des composants faillibles, et l'on ne souhaite plus leur confier de tâches essentielles sans une protection par des équipements électroniques beaucoup plus fiables que l'être humain. Cette démarche a été menée très loin, dans le cas des transports urbains à conduite automatique intégrale, dans laquelle l'intervention de l'homme dans des processus mettant en jeu la sécurité a été minimisée (David et al. 1994) et (Hadj-Mabrouk 1996b).

A un niveau moindre, la SNCF a mis au point un dispositif de contrôle de vitesse ponctuel (KVP) pour renforcer les signaux de ralentissement. Ce système est réalisé en 1978 et appliqué à la gare banlieue souterraine de Paris Lyon. Une extension de son emploi a été réalisée sur la ligne B du RER à partir de 1988. Il s'agit d'un contrôle de vitesse ponctuel dont le développement reste limité à quelques situations particulières d'exploitation.

Le KVP a été ensuite remplacé par le KVB (contrôle de vitesse par balises). Ce dernier a permis à la SNCF de doubler la signalisation visuelle latérale sur une grande partie de son réseau. Le KVB surveille la vitesse réelle du train et permet son ralentissement et son arrêt automatique d'urgence si un conducteur ne respecte pas une séquence d'arrêt.

En outre, la SNCF a élaboré le dispositif VACMA (Veille Automatique à Contrôle du Maintien d'Appui) pour détecter une défaillance physique du conducteur de sorte que les opérations d'arrêt automatique du train se mettent en œuvre lorsque le conducteur n'atteste pas qu'il est effectivement en état de veille.

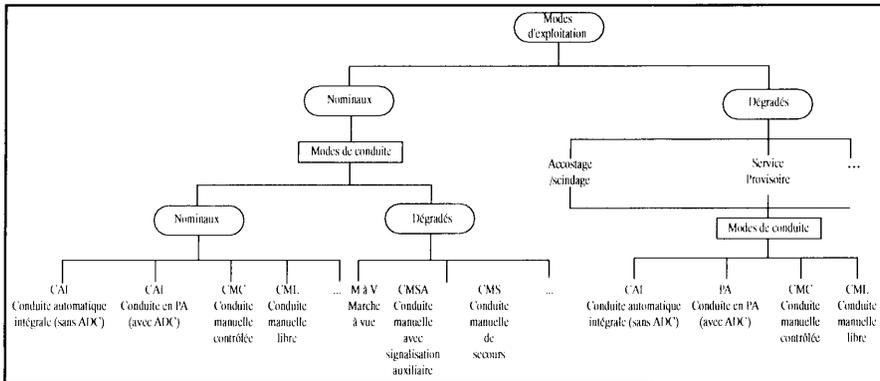
Cependant, si 60 à 80 % des accidents sont attribués à l'erreur humaine, des enquêtes sur les causes d'accident ont révélé que ce jugement devrait être nuancé (circulaire 249 OACI 1994).

La mauvaise conception des matériels, l'intégration inadéquate Homme-Machine et la conception peu appropriée des Interfaces Homme-Machine (IHM) en sont les principales causes. La difficulté éprouvée par l'OH, lors de l'accomplissement d'une tâche, est d'autant plus importante que le système et l'interface Homme-Machine ne sont pas adaptés aux tâches dont il a la charge.

Ces considérations étant faites, il nous semble judicieux d'étudier quelques modes d'exploitation et de conduite ainsi que les différents rôles assumés successivement par les automatismes et l'opérateur humain dans plusieurs systèmes de transport ferroviaire guidés.

On distingue généralement deux grands modes de conduite : les modes nominaux et les modes dégradés (figure 4). Les modes nominaux, comportent la Conduite Automatique Intégrale (CAI) sans agent de conduite, la Conduite en Pilotage Automatique (PA) avec agent de conduite, la Conduite Manuelle Contrôlée (CMC) et la Conduite Manuelle Libre (CML) avec agent de conduite. Les modes dégradés comportent principalement la Conduite Manuelle en Marche à Vue (MàV), la Conduite Manuelle avec Signalisation Auxiliaire (CMSA) et la Conduite Manuelle de Secours (CMS) (Hadj-Mabrouk H. et al. 1998).

Figure 4 : Exemple de classification des modes de conduite (Hadj-Mabrouk et al. 1998)



1. Conduite Automatique Intégrale (CAI) sans agent de conduite

On parle de « conduite automatique intégrale » lorsqu'en mode d'exploitation nominal, on prévoit une conduite en pilotage automatique sans agent de conduite ni accompagnateur à bord.

Ce type de conduite est précisé dans l'article 31 bis (conduite automatique) du Décret n°730 du 22 Mars 1942 qui stipule : « Par dérogation, le Ministre chargé des Transports peut autoriser la mise en service de trains sans agent de conduite. Cette autorisation est délivrée après agrément des équipements automatiques, de surveillance, et approbation des règlements d'exploitation ».

2. Conduite en Pilotage Automatique (PA) avec agent de conduite

En pilotage automatique, les commandes d'accélération, de freinage, d'arrêt en station sont exécutées par le pilote automatique fonctionnel ATO (Automatic Train Operation), sous la surveillance des automatismes de sécurité nommés ATP (Automatic Train Protection).

Dans ce contexte, l'intervention de l'agent de conduite (ADC) est limitée à quelques tâches : donner l'ordre de départ, commander la fermeture des portes, provoquer éventuellement l'arrêt d'urgence du train en cas d'incidents contraires à la sécurité,...

Ce type de conduite en Pilotage Automatique (PA) avec agent de conduite (ADC) est précisé dans l'article 31 (conduite avec 1 seul agent) du Décret n°730 du 22 Mars 1942 qui stipule : « Le nombre total d'agents se trouvant dans un train doit être de deux au minimum sur les lignes à double voie.

Toutefois, l'exploitant peut recevoir l'autorisation de ne faire accompagner les trains que par un seul agent, à condition que ces trains comportent à la fois un équipement permettant leur conduite automatique et le dispositif spécial défini à l'article 30 ».

3. Conduite Manuelle Contrôlée (CMC)

L'agent de conduite (ADC), conduit le train en donnant les ordres de traction, freinage, de commande des portes ainsi que l'ordre de départ. Les automatismes de sécurité assurent la surveillance de la vitesse ainsi que le non-franchissement des signaux fermés.

4. Conduite manuelle libre (CML)

On appelle conduite manuelle libre le mode de déplacement d'un train pendant lequel les ordres de mouvement ou d'arrêt résultent à tout moment de l'action de l'agent de conduite. La conduite manuelle n'est considérée que sur ordre ou dans le cadre de consignes générales. Elle nécessite le respect des règles relatives au type de marche qui lui est associé.

5. Conduite en Marche à Vue (MàV)

C'est une conduite en mode dégradé (fonctionnement anormal de la signalisation, zones non équipées,...) réalisée par les agents de conduite. Dans le cadre de ce type de marche, l'ADC est responsable de la marche de son train, il doit respecter les départs sur ordres ainsi que la signalisation. En effet, lorsque l'agent de conduite manœuvre le commutateur de conduite pour le placer en position conduite manuelle, il devient responsable de la sécurité d'espacement de la rame. La vitesse de circulation est limitée à une valeur compatible avec la visibilité. Lorsqu'on applique les règles de marche à vue pour tout train avec voyageurs, le déplacement du train ne doit pas dépasser une vitesse V.

Dans le cadre des lignes A et B de Lyon, cette vitesse ne doit pas excéder 25 Km/h. Dans ce contexte, le système surveille uniquement la vitesse limite. Le franchissement de la signalisation en avarie doit être effectué en ayant recours aux règles relatives aux instructions d'exploitation de signalisation.

6. Conduite Manuelle avec Signalisation Auxiliaire (CMSA)

On appelle conduite manuelle avec Signalisation Auxiliaire (CMSA) le mode de déplacement d'un train pendant lequel les ordres de mouvement ou d'arrêt résultent à tout moment de l'action de l'agent de conduite en respectant une signalisation latérale simplifiée. Elle nécessite le respect des règles relatives au type de marche qui lui est associé.

7. Conduite Manuelle de Secours (CMS)

La marche secours est utilisée dans plusieurs cas et notamment lorsque le système de sécurité embarqué est défaillant et qu'en particulier, il empêche tout relâchement du freinage. Il doit donc être mis volontairement hors circuits pour permettre de dégager la rame avariée. Elle est utilisée également lors de la prise en secours d'une rame pour permettre l'accostage et le déplacement du convoi.

En marche secours, lorsque le train est sans voyageurs, la vitesse maximum est limitée (elle est fixée à 35 Km/h pour les lignes A et B de Lyon). Tout dépassement de cette vitesse provoque un freinage d'urgence en vue de ramener la vitesse à une valeur inférieure. Le passage en « Marche secours » inhibant les fonctions sécuritaires de la

signalisation, le franchissement des signaux fermés, éteints ou douteux est soumis aux règles de franchissement de ces signaux (Instruction d'Exploitation Signalisation).

La liste de types de conduite précédemment évoqués ne prétend pas être exhaustive. En outre, ces types de conduite ne sont pas tous mis en œuvre dans tous les systèmes existants et il peuvent être rencontrés sous des appellations différentes.

Le tableau ci-dessous présente une classification de ces modes de conduite, en distinguant le rôle de l'Agent de Conduite (ADC), le rôle des automatismes de sécurité et enfin quelques exemples de systèmes de transport guidés (Hadj-Mabrouk H. et al. 1998).

Tableau 1 : Principaux rôles de l'agent de conduite dans des situations nominales et dégradées (Hadj-Mabrouk H. et al. 1998)

Conduite nominale	Rôle de l'opérateur de conduite	Rôle des automatismes	Exemples de systèmes
Pilotage Automatique Intégral	Pas d'opérateur à bord des mobiles	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire le train - Contrôler la vitesse - Commander le FU - Commander les portes 	<ul style="list-style-type: none"> - VAL - MAGGALY - METEOR - POMA 2000 de Laon.
Pilotage Automatique avec OH de conduite	<ul style="list-style-type: none"> - Commande des portes - Commande le départ du train 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôler la vitesse - Commander le FU - Commander les portes 	<ul style="list-style-type: none"> - Métro de Paris - Métro de Lyon A et B - Métro du Caire ligne 2
- Conduite Manuelle Contrôlée	<ul style="list-style-type: none"> - Fournit les ordres de traction - Fournit les ordres de freinage - Commande les portes - Commande le départ du train 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôler la vitesse - Contrôler le non franchissement des signaux fermés. - Contrôler la vitesse - Contrôler le non-franchissement des signaux fermés - Contrôler l'affichage en cabine de la vitesse maximale autorisée 	<ul style="list-style-type: none"> - KVB, KVBP, - KMT ligne C de Lyon - Métro du Caire ligne2 - SACEM - TVM 300 - TVM 430
Conduite Manuelle Libre	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire le train - Commander les portes - Commander le départ du train 	Pas d'automatisme de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - Métro de Paris - Tramway - Trains SNCF
Conduite dégradée			
Conduite en Marche à vue à vitesse restreinte	<ul style="list-style-type: none"> - Fournit les ordres de traction et freinage - Commande les portes, le départ du train et le respect de l'espacement 	Contrôler la vitesse limitée	<ul style="list-style-type: none"> - Métro de Lyon A et B - Métro du Caire ligne 2
Conduite Manuelle avec Signalisation Auxiliaire	Conduire le train, commander les portes ainsi que le départ du train en respectant une signalisation latérale simplifiée	L'automatisme de sécurité est totalement inactif	<ul style="list-style-type: none"> - Métro Lyon A et B.
Conduite Manuelle de Secours	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire le train - Commander les portes - Commander le départ et l'arrêt 	L'automatisme de sécurité est totalement inactif	<ul style="list-style-type: none"> - Métro Lyon A et B.

Dans les situations nominales, le rôle de l'OH de conduite est souvent limité à la commande des portes ou de départ du train. Cependant, lorsque l'automatisme de sécurité est totalement inactif (situations dégradées) son rôle est décisif notamment en cas de conduite manuelle de secours (figure 5). En plus, l'absence d'opérateur à bord des mobiles (Meteor) n'exclue pas la place de l'OH dans le système automatisé, puisque c'est lui qui dirige le PCC de ce système.

Même si la présence de l'OH est parfois une cause d'erreur, elle demeure indispensable. En effet, il est le seul capable de faire face à l'imprévu par ses capacités d'anticipation et de récupération (erreur imprévue de l'automatisation).

Malgré l'avènement des automatismes, l'OH reste l'élément clef du système et joue un rôle déterminant dans des situations dégradées. Il reste le meilleur agent de fiabilité ; il le sera d'autant mieux que son rôle sera prévu dès la spécification des besoins et que l'automatisation sera centrée sur lui (Hadj-Mabrouk 1998).

Exemples d'erreurs humaines dans les transports ferroviaires

Il existe plusieurs facteurs favorisant l'occurrence d'erreurs : facteurs externes (situation de travail, équipement), facteurs internes (formation, condition physique) et facteurs de stress (d'origine physiologique ou psychologique).

Les erreurs humaines dans le domaine de sécurité du transport ferroviaire guidé concerne notamment les opérateurs d'exploitation (ADC et opérateur au PCC).

Les erreurs potentielles de l'opérateur du PCC sont souvent relatives au non respect des procédures de d'accostage, d'initialisation ou d'évacuation.

Les erreurs potentielles de l'agent de conduite se répartissent généralement en deux grandes classes : le non respect de la signalisation (franchissement de signal d'arrêt, non respect des feux, etc.) et l'erreur de commande ou de manœuvre (freinage intempestif ou brusque, non respect de la consigne de vitesse, ouverture prématurée ou intempestive des portes, etc.) (Hadj-Mabrouk 1995a et 1996b).

Cependant, l'erreur humaine n'est souvent que l'impossibilité dans laquelle s'est trouvé un opérateur de faire face à une situation anormale, qu'il s'agisse de la défaillance d'un appareil ou d'un jeu de circonstances inattendues (De Keyser 1982) : changement organisationnel, de procédure, d'environnement ou même altération de rapports interindividuels ou interservices.

Inhérente à toute intervention humaine, l'erreur humaine est un symptôme révélateur d'une mauvaise organisation du travail, une formation insuffisante ou inadéquate. En la comprenant et la gérant elle peut devenir paradoxalement un élément de sécurité. La prise en compte du comportement humain dans la conception même de la machine peut garantir une plus grande sécurité des systèmes pilotés (Wanner 1989).

D'où l'intérêt d'une automatisation centrée sur l'OH.

Principes d'une automatisation centrée sur l'homme

Les enquêtes sur les accidents graves survenus depuis vingt ans dans des systèmes employant des technologies très avancées (Three Mile Island et Tchernobyl – énergie nucléaire, Tenerife – aviation civile, Challenger – technologie spatiale) ont révélé qu'une conception peu appropriée ou défectueuse des interfaces entre les OH et la technologie étaient parmi les principaux facteurs causaux.

Dans ces accidents, l'erreur humaine a été induite par des carences et des défauts dans la conception, les procédures, la formation ou l'organisation. La prise en considération des facteurs humains devrait être intégrée dans les systèmes dès le tout début du processus de conception et non rajoutée ultérieurement, face à une carence. Une automatisation centrée sur l'élément humain évite les catastrophes et les accidents et réduit de ce fait les coûts (Circulaire 249 OACI 1994).

Une automatisation conçue en termes d'aide à l'opérateur consiste non seulement à suppléer à ses points faibles mais également à optimiser ses points forts et à potentialiser ses ressources. Elle favorise la maîtrise de la situation par l'opérateur et améliore la fiabilité de l'activité de conduite. Une telle automatisation a pour objectif d'aider l'opérateur à comprendre la situation, à prendre lui même les décisions d'action (y compris de recherche d'informations) et à réaliser ses actions (De Montmollin 95).

Elle doit donc débarrasser au maximum l'opérateur des détails du traitement des données (surtout inutiles à la compréhension de la situation), prendre le relais de l'opérateur lorsque ses capacités physiologiques, psychologiques et cognitives ne lui permettent plus d'agir (temps de réaction très court, quantité d'information à traiter importante, surveillance en continu, etc.) et aider éventuellement la coopération entre les différents opérateurs (De Montmollin 95).

Pour apporter des solutions à ces problèmes, dans le cadre d'une conception centrée sur l'homme, Sagot et al. (2001) se proposent de montrer la place de l'ergonomie dans la conception du poste de conduite d'un nouveau TGV. A travers la définition du champ des activités futures souhaitables (en termes de sécurité, de santé, de confort et d'efficacité), cette étude vise à concevoir des systèmes adaptés aux caractéristiques des futurs utilisateurs en se basant sur des connaissances relatives au composant humain.

Ce travail est basé sur l'analyse des relations qui existent entre l'exigence de la tâche confiée à l'homme, le milieu de travail et les caractéristiques socioculturelles et biométriques des conducteurs ciblés (formation, qualification, expérience, état de santé, critères physiologiques, critères anthropométriques, capacités et limites,...).

Les principes d'une automatisation centrée sur l'élément humain sont fondés sur le fait que l'homme assume la responsabilité ultime de la sécurité du système (Circulaire 249 OACI 1994). Par conséquent :

- *Il faut que l'homme commande* : Il faut lui conférer une autorité pratiquement illimitée même si le système automatisé est entièrement opérationnel ;
- *Pour commander effectivement, il faut que l'homme soit impliqué* : Il faut lui confier, tout au long des opérations des tâches pertinentes et utiles. Il faut qu'il reste le maître de la situation ayant un rôle de contrôle actif sur le système ;

- *Pour s'impliquer, il faut que l'homme soit informé* : il doit disposer d'un flux continu d'informations essentielles sur l'état et l'évolution du système contrôlé pour pouvoir intervenir de façon pertinente ;
- *Il ne faut automatiser une fonction que s'il y a de bonnes raisons de le faire* : l'élément moteur de la conception doit être les besoins des opérateurs qui auront à utiliser les produits de cette conception et à en assurer la maintenance plutôt que la faisabilité technique ;
- *Il faut que l'homme soit en mesure de surveiller le système automatisé* : Il faut lui fournir les informations dont il a besoin pour être prêt aux interventions si nécessaire et pour pouvoir s'assurer que la performance des automatismes est appropriée pour la situation souhaitée du système ;
- *Il faut que les systèmes automatisés soient prévisibles* : l'homme ne pourra détecter rapidement les écarts des systèmes automatisés par rapport au comportement normal et reconnaître ainsi leurs défaillances que lorsque ces derniers se comportent normalement de façon prévisible ;
- *Il faut aussi que les systèmes automatisés puissent surveiller l'opérateur humain* : il est nécessaire que la détection, le diagnostic et la correction d'une éventuelle erreur humaine fassent partie intégrante de tout système automatisé. Il faut donc que la performance humaine, aussi bien que celle de la machine, soit constamment surveillée ;
- *Il faut que chaque élément du système ait connaissance des intentions des autres* : la communication des intentions de l'homme et du système permet que toutes les parties intervenantes coopèrent pour résoudre tout problème susceptible de survenir ;
- *Il faut que l'automatisation soit conçue de manière à être simple à apprendre et à utiliser* : la simplicité, la clarté et la possibilité de compréhension intuitive doivent être les pierres angulaires de la conception d'un système automatisé. Une automatisation plus simple permettra que les interfaces soient plus simples et que les hommes comprennent mieux les systèmes automatisés.

Les principes d'une automatisation centrée sur l'élément humain sont destinés à servir de référence pour toute nouvelle conception et réalisation d'une automatisation.

Questions soulevées par une automatisation centrée sur l'homme

L'apport d'une automatisation centrée sur l'élément humain est considérable dans l'amélioration de la sécurité des transports automatisés. Néanmoins une telle automatisation n'élimine pas les problèmes relatifs à l'homme lui même ou à sa coopération effective avec la machine.

Ces problèmes sont liés surtout à ses caractéristiques physiques, physiologiques, psychologiques et cognitives (état de santé, typologie circadienne de sommeil, niveau de vigilance – décalage horaire et de performance, etc.) et au contexte réel du travail (horaires et charge de travail).

Une automatisation centrée sur l'homme soulève néanmoins plusieurs questions (Hadj-Mabrouk 1998) :

- Comment gérer la variabilité des OH : face à une situation identique les OH peuvent agir différemment ?
- Comment établir une véritable coopération Homme-système ?
- Comment détecter et résoudre d'éventuels conflits liés à cette coopération ?
- Comment évaluer la charge de travail de l'OH (peu de travail entraîne l'inattention – surcharge : risque de ne pas assurer la sécurité)
- Comment préciser clairement les fonctions, les contributions et les responsabilités de l'OH par rapport au système ?
- Comment maintenir le niveau d'expertise et de vigilance de l'OH ?
- Comment éviter de mettre l'OH dans des situations critiques ou d'échec ?
- Comment assurer l'adéquation des aides automatisées et les possibilités des OH pour mettre à profit leurs points forts ?
- Comment concevoir des systèmes automatisés tolérants aux erreurs éventuelles de l'OH ?
- Comment tenir compte dès la conception des possibilités et des limites des OH ?
- Comment prendre en compte et intégrer le retour d'expérience dès la spécification ?
- Comment former et sensibiliser les hommes aux risques liés aux Facteurs Humains ?

L'ensemble de ces questions engendre une autre interrogation plus large qui fait actuellement l'objet de plusieurs travaux de recherche et qui concerne la répartition des tâches, dites critiques de sécurité, entre l'homme et la machine. Quelles sont les tâches qu'il faut confier à l'homme et celles qu'il faut attribuer au système ?

Conclusion

Certes, il existe des limites aux opérateurs humains sur le plan perceptif pour l'acquisition et le traitement des informations et sur le plan physique pour l'exécution des actions résultantes.

La variabilité des compétences des OH, la complexité du système de transport et le manque de souplesse du système d'information sont autant de facteurs augmentant la difficulté des tâches de supervision et d'action de l'OH.

Cependant, on est encore loin d'un stade où les OH ne joueraient plus aucun rôle dans la sécurité des systèmes de transport ferroviaire, et où les risques ne découleraient plus que des erreurs se manifestant au niveau de la conception et de la réalisation des systèmes. En effet, la complexité et l'originalité des nouveaux systèmes de transport confèrent un rôle décisif à l'OH dans la sécurité des circulations des trains.

Sa réussite dans l'accomplissement d'une tâche de conduite dépend de plusieurs facteurs. Elle dépend entre autres de ses capacités perceptives et cognitives, de la validité des différents modèles mentaux qu'il s'est forgé du système, de son état psychologique,

de sa charge de travail de la complexité des situations de conduite ou encore de son état de stress, par exemple dans des situations d'urgence où la sécurité est menacée.

Malgré l'avènement des automatismes, l'opérateur humain (OH) reste l'élément clef du système de transport et demeure indispensable. Parfois, son action est la seule défense pour éviter qu'une défaillance ou panne des automatismes ne devienne un accident.

L'OH est un élément paradoxal : en situation de stress ou de fatigue, il peut être un élément de la perte de la fiabilité d'un système. Cependant, dans certaines situations critiques d'insécurité, il peut être un facteur de fiabilité, en rétablissant le bon fonctionnement du système, parfois par des actions non prévues par le règlement de sécurité de l'exploitation mais, liées à sa connaissance, son expérience et son savoir-faire ; il rattrape alors des erreurs commises par le concepteur.

Il faut donc optimiser la place de l'homme dans le système de transport en pleine connaissance de ses capacités mais aussi de ses limites. La sélection et la formation des hommes ne suffisent plus à obtenir la performance escomptée.

Pour obtenir une performance mieux maîtrisée des systèmes de transport, il est nécessaire de concevoir des systèmes tolérants aux erreurs éventuelles de l'OH, de préciser la contribution de l'OH dans un système, de mieux organiser et structurer les retours d'expérience et d'analyser la charge de travail des OH.

Il convient également de développer des outils d'aide à la décision, de développer des systèmes dont les fonctionnalités procurent à l'OH flexibilité et adaptabilité, de comprendre l'OH en situation nominale et dégradée, de dégager des moyens pour améliorer la situation de travail afin de prévenir les conséquences négatives et favoriser les conséquences positives (Hadj-Mabrouk 1996b).

En somme, il faut intégrer les facteurs humains dès la spécification des besoins et dès la conception du système afin de concevoir des systèmes qui s'adaptent à l'OH et non le contraire. D'où l'intérêt du projet FACTHUS qui a été initié à l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) en 1995 (Hadj-Mabrouk 1995b).

Objectif du projet « FACTHUS »

Le projet FACTHUS vise à intégrer la prise en compte des facteurs humains lors du développement des systèmes industriels et notamment dans le processus de construction de la sécurité des systèmes de transport ferroviaires. A ce jour, il convient de constater que cette prise en compte des facteurs humains dès la phase de spécification du projet est très rare.

Les concepteurs de systèmes de transport ont souvent tendance à penser l'opérateur humain comme le maillon faible de ces systèmes. Cette vision conduit, sinon à l'exclusion de l'opérateur humain, au moins à une restriction de ses marges de manœuvre, par des contraintes procédurales ou par une automatisation poussée.

Nos travaux de recherche s'écartent clairement de cette perspective : l'opérateur y est considéré sur ces deux aspects, facteur d'infiabilité mais également de fiabilité.

Contexte général de l'étude

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre la DTT (Direction des Transports Terrestres) et l'INRETS (Hadj-Mabrouk 1996b) et (Hadj-Mabrouk et Dogui 1998).

Elle est motivée essentiellement par l'absence de formalisme dans l'expression des besoins au regard des facteurs humains et s'attache à (Hadj-Mabrouk 1995b) :

- Préciser la contribution de l'opérateur humain et sa responsabilité dans l'exploitation des systèmes de transport automatisés ;
- Comprendre son comportement dans les différents modes d'exploitation (conduite automatique intégrale, conduite en pilotage automatique avec agent de conduite, conduite manuelle contrôlée, conduite manuelle libre, conduite en marche à vue à vitesse restreinte, conduite manuelle avec signalisation auxiliaire,...) ;
- Analyser les circonstances qui provoquent le dysfonctionnement Humain ;
- Prendre en compte son rôle, sa responsabilité, son comportement, ses capacités et ses limites dès la spécification du système.

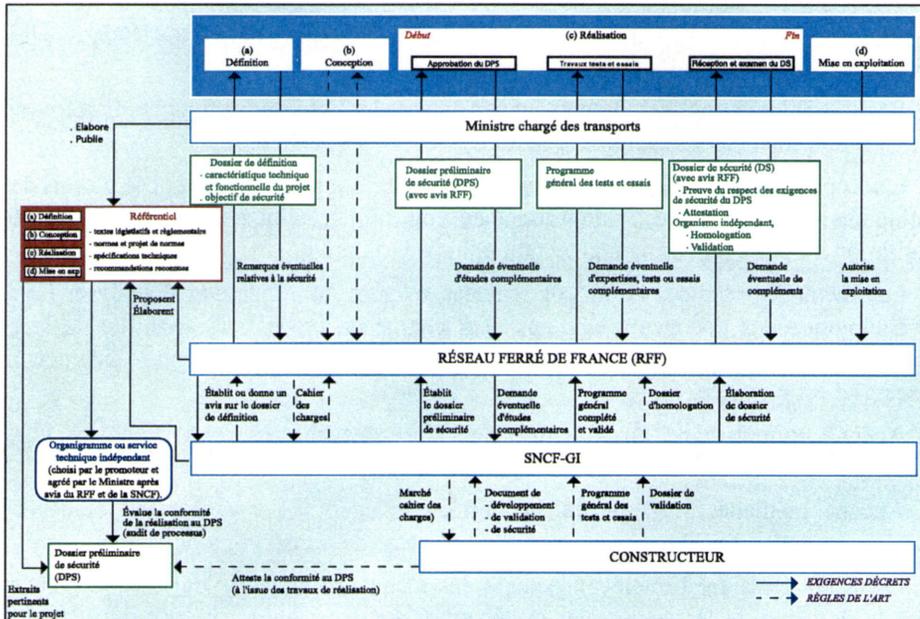
Cette étude consiste à élaborer une méthode de développement d'un système de transport guidé intégrant les facteurs humains non seulement au niveau des analyses de sécurité (analyse préliminaire de risques, analyse fonctionnelle de la sécurité,...) mais aussi au niveau des activités de développement du système de transport (spécification, conception,...).

L'intérêt premier de cette étude est d'optimiser le processus de mise en sécurité des systèmes de transport guidés. Cette recherche doit donc déboucher sur l'élaboration d'une approche méthodologique décrivant les principaux critères et contraintes liés aux facteurs humains à considérer lors des activités d'analyse de sécurité et de développement du système (Hadj-Mabrouk 1996a) et (Hadj-Mabrouk et Dogui 1998)...

L'ensemble de ces critères et contraintes doit être pris en compte par les cinq principaux acteurs suivants (figure 5) (Hadj-Mabrouk et Desfray 2000) :

- Le Réseau Ferré de France (RFF), lors de l'élaboration du dossier de définition (ou d'initialisation) du système et du règlement de sécurité de l'exploitation ;
- La Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), lors de l'établissement du dossier préliminaire de sécurité, du dossier de sécurité et du dossier d'homologation ;
- Le constructeur (maître d'œuvre) lors du développement et de la validation de son système ;
- L'organisme ou service technique compétent et indépendant (ex : l'agence de certification ferroviaire CERTIFER), lors de l'élaboration du rapport de certification (ou d'évaluation) ;
- Le Ministre chargé des transports, lors de l'approbation du dossier de définition du projet, du dossier préliminaire de sécurité, de l'autorisation de mise en service du système et de son suivi en exploitation.

Figure 5 : Principaux acteurs impliqués dans la définition, la conception, la réalisation et la mise en exploitation des nouveaux systèmes (Hadj-Mabrouk et Desfray 2000) (cf. Décret n° 2000-286 du 30 mars 2000 relatif à la sécurité du réseau ferré national) (J.O. n° 78 du 1^{er} avril 2000)



Motivations du projet Facthus

Il semble qu'un consensus existe à propos des objectifs et de la place d'une démarche facteurs humains au sein d'un projet, il en va autrement de la terminologie, des techniques et démarches employées.

Les méthodes proposées ne font pas toujours l'objet d'un consensus même au sein d'un même secteur d'activité.

Il n'existe pas suffisamment de recommandations normatives dans le domaine du facteur humain qui est en pleine évolution. Les usages sont très variés, ce qui est préjudiciable à la qualité des méthodes de développement des projets où la sécurité est primordiale.

Les objectifs des entreprises dans le domaine des facteurs humains ne sont pas toujours les mêmes. Certaines développent des démarches pour réduire les erreurs des opérateurs humains dans l'exécution d'une tâche, d'autres pour améliorer les conditions de travail des opérateurs et d'autres encore, pour quantifier la probabilité d'erreurs humaines ou étudier les incidences du système sur l'activité des opérateurs.

La terminologie et les démarches sont très fluctuantes, voire contradictoires d'un secteur à l'autre. Le vocabulaire utilisé souffre d'imprécisions ou de confusions. Par exemple, les concepts de facteur humain, d'ergonomie, de fiabilité humaine..., souffrent

de l'absence de définitions rigoureuses et admises par tous. Cette diversité menace la bonne compréhension des documents et démarches analysés.

Certaines démarches proposées sont en grande partie théoriques et ne sont pas soutenues par des applications industrielles. Ceci nous empêche d'apprécier leur bien fondé. Les secteurs les plus en pointe dans ce domaine sont le nucléaire (EDF), l'armement (DGA) et l'aéronautique (CNES).

Rares sont les entreprises qui prennent en compte les besoins des futurs utilisateurs en amont d'un projet (spécification des besoins).

L'acceptation d'une démarche facteur humain par les chefs de projet pose parfois des problèmes et des craintes : alourdissement du projet, allongement des délais de réalisation du projet et enfin, augmentation du coût du projet.

Les méthodes étudiées ne préconisent pas d'approche permettant d'analyser l'état psychologique des opérateurs humains, leur charge de travail, la variabilité de leurs compétences ou encore leur état de stress, par exemple, dans des situations d'urgence où la sécurité est menacée.

Aucune entreprise ne propose dans le cahier des charges d'un projet un volet spécifique aux facteurs humains.

Aucune méthode, à elle seule, ne permet de couvrir l'ensemble des étapes de développement et d'analyse de sécurité d'un système de transport guidé.

En résumé, malgré l'intérêt indéniable des méthodes étudiées, leur mise en œuvre dans le domaine de la sécurité des systèmes de transport guidés n'est pas suffisante. Aucune méthode, à elle seule, ne permet d'assurer l'exhaustivité de l'analyse.

A titre d'exemple, les approches et techniques relatives à l'étude de la vigilance et de la typologie du sommeil des opérateurs humains n'ont pas été abordées de manière formelle dans le domaine de la sécurité des systèmes de transport guidés.

On mesure alors tout l'avantage de disposer d'une méthode de prise en compte des facteurs humains, dans le développement et l'analyse de sécurité d'un système, commune à tous les constructeurs et exploitants des transports ferroviaires (Hadj-Mabrouk 1996b).

Approche méthodologique d'intégration des facteurs humains dans l'analyse de la sécurité des systèmes de transports guidés

L'analyse profonde des différentes méthodes de développement d'un système de transport ferroviaire proposées dans la littérature ou mises en œuvre par les industriels du domaine, a révélé l'absence de prise en compte de manière formelle des facteurs humains dès la phase de spécification du système.

Afin de pallier à ce manque et d'améliorer sensiblement le niveau de sécurité des systèmes de transport ferroviaires, nous avons proposé un modèle conceptuel faisant intervenir six dimensions (figure 7) (Hadj-Mabrouk 1998) et (Hadj-Mabrouk et Dogui 1999) :

La première dimension est constituée des étapes de développement d'un système : spécification, conception, réalisation des équipements matériels et logiciels, intégration et validation fonctionnelle du système.

La deuxième dimension regroupe les étapes d'analyse de sécurité : analyse préliminaire de risques (APR), analyse fonctionnelle de sécurité (AFS), analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), analyse des effets des erreurs du logiciel (AEEL), etc.

La troisième dimension précise les méthodes et outils à considérer lors de chaque étape de développement. Par exemple, la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technique), le GRAFCET et les Réseaux de Pétri peuvent être employés lors de la première phase de spécification.

La quatrième dimension, quant à elle, propose les méthodes et outils d'évaluation adéquats permettant notamment :

- de démontrer, par essai et analyse, si un produit, à chaque phase de son cycle de vie, satisfait ou non à toutes les exigences de la phase précédente (vérification) ;
- de démontrer, par essai et analyse, que le système considéré satisfait en tous points à ses spécifications (validation) ;
- de vérifier que chaque phase du cycle de vie satisfait aux exigences spécifiques de sécurité ;
- d'apporter les preuves (démonstrations, calculs, résultats d'essais,...) que le système est conforme aux spécifications notamment celles relatives à la sécurité ;
- de vérifier que la conception et la réalisation sont effectuées conformément aux règlements en vigueur et aux règles de l'art ;
- de s'assurer que le système est conçu et mis en œuvre de telle sorte que le niveau de sécurité obtenu soit au moins globalement équivalent au niveau de sécurité des systèmes analogues déjà en fonctionnement ;
- de vérifier que les matériels roulants et les installations accessibles au public sont conçus et réalisés de manière à permettre la délivrance des informations nécessaires pour assurer la sécurité des voyageurs et des agents, ainsi que la mise en œuvre des moyens propres à donner l'alerte en cas d'accident ou d'événement dangereux ou supposé tel.

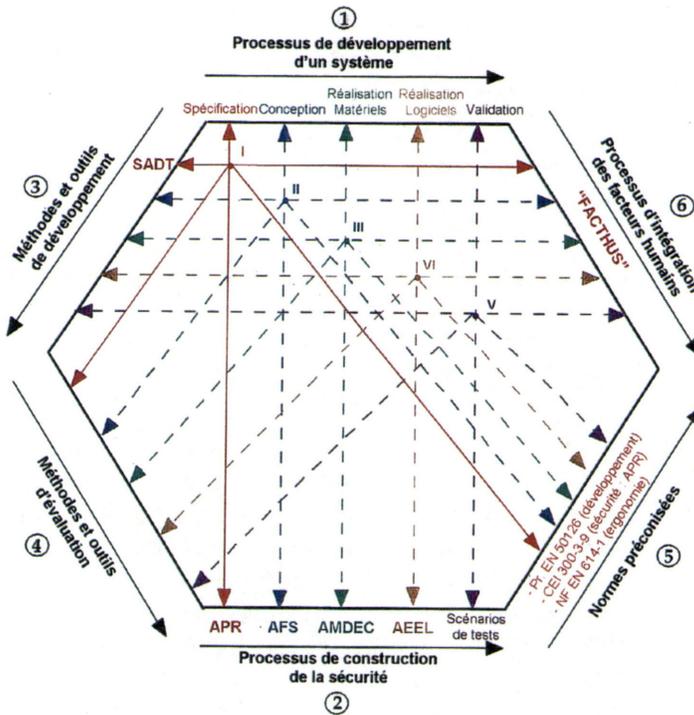
La cinquième dimension s'attache à vérifier que les activités de développement (dimension 1), les analyses de sécurité (dimension 2), les méthodes et outils de développement (dimension 3), les méthodes et outils d'évaluation (dimension 4) et les étapes d'intégration des facteurs humains (dimension 6) sont effectués conformément à des règlements, normes, normes provisoires, spécifications techniques ou recommandations reconnues et pertinentes, relatives notamment à la sûreté de fonctionnement (fiabilité, sécurité, disponibilité et maintenabilité), à la qualité, à l'ergonomie, à la fiabilité humaine et aux concepts de facteurs humains.

Par exemple, lors de la première étape de spécification, on peut faire appel conjointement aux normes suivantes :

- norme CENELEC EN 50126 (dimension 1 : développement). Cette norme propose une procédure commune pour spécifier les exigences de sûreté de fonctionnement dans les applications ferroviaires et pour montrer que ces exigences sont satisfaites. Cette norme concerne principalement le niveau système. Les aspects logiciels et matériels sont présentés respectivement dans les deux normes EN 50128 et EN 50129.
- norme CEI 300-3-9 (dimension 2 : analyse du risque). Cette norme propose un processus d'analyse du risque ainsi que les méthodes applicables. Pour les autres méthodes d'analyse de sécurité, on peut employer, par exemple, la norme NF F 00-101 qui présente une méthode de détermination et les règles de traitement des fonctions de sécurité dans le domaine du matériel ferroviaire, ou la norme X60-510 qui précise les principes à suivre pour appliquer une AMDEC ou encore la norme NF F 71-013 qui donne une description des principales phases de réalisation d'une AEEL.
- norme NF EN 614-1 (dimension 6 : facteurs humains). Cette norme donne les principes ergonomiques à suivre avant et pendant le processus de conception d'équipements de travail et plus particulièrement des machines.

Enfin, la dernière dimension (dimension 6) vise l'intégration des facteurs humains non seulement dans les activités de développement, mais aussi tout au long du processus de construction de la sécurité (figure 6).

Figure 6 : Modèle " HEXAGONE " centré sur L'Homme et la sécurité (Hadj-Mabrouk 1998) et (Hadj-Mabrouk et Dogui 1999)



Conclusion

Lors de ce chapitre, on a mis l'accent sur la place de l'erreur humaine dans la genèse des accidents ferroviaires. Néanmoins, l'analyse de la place de l'homme dans les transports automatisés, montre que l'homme demeure un élément déterminant dans la sécurité des systèmes socio-techniques. Dans ce sens, on a proposé une approche d'intégration des facteurs humains dans la sécurité des transports ferroviaires guidés.

Cette approche fait l'objet d'un projet de recherche « FACTHUS », en cours de développement, qui s'articule autour de plusieurs tâches chronologiques. Une tâche principale de ce programme consiste à étudier l'apport de la chronobiologie de la vigilance et des performances au domaine de la sécurité des transports ferroviaires guidés.

Chapitre 5

Approche d'application de la chronobiologie de la vigilance à la sécurité des transports ferroviaires

Il est actuellement admis que le niveau de vigilance et de performance fluctue dans la journée avec des pics et des creux survenant à des heures déterminées (rythmes de la vigilance). Cependant les facteurs influençant ces fluctuations ne sont pas encore bien établis. L'erreur humaine liée à une baisse de la vigilance des opérateurs humains demeure la cause principale des accidents ferroviaires.

L'essentiel des travaux dans ce domaine ont porté sur la tâche de conduite. Peu d'études ont été consacrées aux contrôleurs de PCC ou à d'autres catégories d'opérateur.

En effet, Cabon (1995) a révélé chez les conducteurs de trains la survenue de fréquents épisodes d'hypovigilance en début d'après-midi et en début de nuit au cours de la conduite et lors des phases nécessitant une attention soutenue (signalisation, tunnel, travaux...). La baisse du niveau d'éveil peut s'expliquer par la réduction de la durée de sommeil des conducteurs liée à l'organisation des horaires de travail (40 % par rapport à la durée habituelle).

Peter (1990b) a montré que les conducteurs de trains entraînés adoptent des stratégies permettant de garder de bonnes performances en dépit de l'hypovigilance constatée lors d'accomplissement de tâches dans des conditions de monotonic.

Alors que le maintien de la vigilance des opérateurs constitue un enjeu important et une des préoccupations essentielles en matière de sécurité ferroviaire, peu de travaux dans ce sens ont été effectués.

D'ailleurs la première journée en France concernant les facteurs humains et l'ergonomie dans le transport ferroviaire (organisée par la SNCF, la RATP...) a eu lieu le 19 septembre 2000 à Toulouse ; un seul article a été présenté et ce n'est qu'un abstract qui a souligné les problèmes de l'hypovigilance sans illustration des résultats.

Ce chapitre se propose d'indiquer, dans sa première partie, les différentes mesures préventives existantes des hypovigilances de l'OH. Les limites des approches proposées font l'objet de la deuxième partie. La dernière partie présente une approche méthodologique d'aide à l'application de la chronobiologie de la vigilance dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires.

Etude de l'existant : mesures de prévention et recommandations proposées

De rares études se sont intéressées à l'étude de la vigilance des conducteurs de trains dans le but de respecter l'exigence de sécurité dans ce domaine.

Selon Sauvignon (1992), deux aspects du problème en relation directe avec la sécurité ferroviaire ont été abordés :

- Des études ponctuelles sur le comportement mécanique qui montrent par une approche expérimentale, une dérive du comportement lors des phases d'hypovigilance.
- Des études sur la qualité du sommeil, qui mettent en évidence l'importance du repos nocturne et l'effet des horaires irréguliers sur le travail du conducteur.

La SNCF a porté son attention sur la sélection du personnel à l'embauche et sur sa formation en tenant compte des facteurs intellectuel, psychomoteur et comportemental grâce à un test informatisé de type situationnel et comportemental appelé ASP : Attention-Surveillance-Performance. Ce test a pour objectif la mesure de l'aptitude à maintenir l'attention et à réagir à des situations de stress (Macaire 1991).

Elle a développé également une autre approche permettant de suivre et garantir au cours du temps les capacités d'attention des conducteurs de trains. Cette approche est basée sur l'observation du comportement verbal et non verbal pendant la réalisation de la tâche, sur l'entretien qui précise les circonstances de doute des capacités attentionnelles et sur des tests psychologiques évaluant les capacités d'attention dans des tâches psychomotrices, de mémoire de travail et dans des situations d'attention perceptive visuelle sélective et partagée (Fayada et Coutier 1995).

Alors que l'une des missions des médecins de travail à la SNCF consiste à dépister, pour y remédier, toutes les circonstances pathologiques responsables d'hypovigilance des agents de conduite, ils pensent que des astuces usées par les conducteurs comme la conduite en position debout, l'ouverture des fenêtres, l'écoute de radio voire les mots fléchés représentent des moyens pour accroître la performance attentionnelle. « *Ce sont ces astuces, tournées vers la sécurité des circulations et l'efficacité de leur travail, que nous voyons comme des créations* » (Fernandez et Clot 2000).

Le dispositif VACMA (Veille Automatique à Contrôle du Maintien d'Appui) est un moyen de détection de la défaillance physique du conducteur. Ce système consiste à évaluer la vigilance du conducteur en testant son aptitude à maintenir l'appui sur la pédale. Une sonnerie est déclenchée après 2,5 secondes du relâchement d'appui et en absence de réaction du conducteur après 2,5 nouvelles secondes, la procédure d'arrêt automatique du train se déclenche. Les opérations d'arrêt automatique du train se mettent en œuvre lorsque le conducteur n'atteste pas qu'il est effectivement en état de veille (Masson 1991).

L'étude de la relation entre la survenue de l'hypovigilance et la modification du comportement biomécanique du conducteur lors de l'utilisation du système VACMA, a conclu à une baisse significative de la force d'appui pendant chaque cycle de maintien au

cours des phases d'hypovigilance. Ces phases transitoires, physiologiques ont une périodicité de 90 à 120 mn au cours desquelles on a constaté l'apparition simultanée des omissions de réponses aux stimuli visuels (feux, panneaux de limitation de vitesse, signaux d'arrêt) (Mollard 1991). Ces fluctuations périodiques rappellent le rythme ultradien de la vigilance.

Macaire et Fayard (1995) ont créé un groupe de prévention pluridisciplinaire pour le maintien de la fiabilité humaine des conducteurs de trains. La fiabilité humaine repose sur trois étapes : la sélection du personnel, leur formation et leur certification. Les principaux acteurs de ce groupe sont l'agent de sécurité, le médecin du travail et le psychologue. Selon l'auteur, ce groupe de prévention améliore l'efficacité de la détection, interprète les signes d'alerte (professionnels, psychosociologiques et physiologiques) et le processus de décision. Cette démarche permet d'augmenter les chances de maintien du conducteur dans ses fonctions, grâce à la précocité du diagnostic, tout en garantissant l'exigence de sécurité pour l'entreprise.

Selon Gadbois (1990), les solutions appropriées ne peuvent être dégagées qu'à partir d'un inventaire précis des exigences temporelles des tâches requises par le fonctionnement du système, et de la confrontation de ces exigences avec les connaissances disponibles sur les caractéristiques du fonctionnement temporel de l'homme. La recherche des aménagements adéquats devra se développer suivant deux grandes voies :

1. L'organisation des horaires de travail : définir le système d'horaire le mieux à même d'assurer une compatibilité acceptable entre les variations quotidiennes des capacités fonctionnelles des opérateurs et les moments où chacun de ceux-ci est requis au travail. Garantir la fiabilité du système socio-technique passe donc aussi par l'adoption d'horaires de travail qui permettent aux travailleurs de prendre leur sommeil et de gérer leur vie personnelle dans des conditions favorables.
2. L'aménagement temporel des exigences des tâches allouées aux opérateurs : distribution optimale des tâches sur l'ensemble du nyctémère au regard des variations des capacités fonctionnelles des opérateurs et réduction du niveau d'exigences de celles-ci. C'est une question tout autant pertinente pour les équipes de jour.

Ces deux voies (aménagement du temps des tâches et meilleure organisation des horaires de travail) sont à exploiter de manière complémentaire, si l'on veut parvenir à intégrer avec succès les dimensions temporelles de l'action dans la conception des systèmes socio-techniques fiables (Gadbois 1990).

Philips-Bertin (1995) propose une activité cognitive de type exercices mentaux pour maintenir et/ou réactiver la vigilance du conducteur au cours d'une tâche monotone.

Limites des approches proposées

Quoique ces observations témoignent de la survenue des épisodes d'hypovigilance à des moments prévisibles du nyctémère en considérant les fluctuations de la vigilance, ces notions de chronobiologie ne sont pas bien prises en compte dans le domaine de la

sécurité des transports ferroviaire. En outre, aucune approche méthodologique d'applications de ces concepts de la chronobiologie aux transports ferroviaires n'a été proposée à ce jour.

Contrairement à Heintz (1992), qui conclut que « *nul n'est en mesure aujourd'hui d'affirmer qu'une partie significative de ceux-ci (incidents ou accidents ferroviaires) est due à une hypovigilance de l'agent de conduite. Nous ne sommes absolument certains que de la nécessité du respect d'une condition limite : on ne peut admettre qu'un conducteur puisse s'endormir en conduisant* » nous pensons que les notions de chronobiologie méritent d'être considérées dans le but d'améliorer la fiabilité humaine dans le domaine des transports guidés.

En considérant que *s'endormir en conduisant* est une condition limite, l'étude des conditions favorables à la propension au sommeil des conducteurs et leur prévention ne peut qu'améliorer la fiabilité humaine. L'hypovigilance et la propension au sommeil sont d'abord régies par le système circadien endogène et favorisées par des facteurs exogènes comme le déficit en sommeil, la pauvreté de l'environnement en stimuli sensoriels éveillants (monotonie de l'environnement), la prise de médicaments hypnotiques ou sédatifs...

Par ailleurs les Opérateurs Humains dans le domaine de transport ferroviaire, surtout les agents d'exploitation (contrôleurs au PCC et agents de conduite), sont soumis à des rythmes de rotation horaires variables pouvant être à l'origine d'une tolérance plus ou moins bonne au travail posté du fait d'une désynchronisation interne de l'individu, souvent constatée chez les travailleurs postés d'autres domaines.

La non-concordance des horaires de travail avec les horaires de meilleure forme et des pics de vigilance impose un effort supplémentaire d'adaptation à ces horaires augmentant ainsi la charge de travail et pouvant affecter la fiabilité de ces opérateurs.

Proposition d'une approche méthodologique d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires

L'analyse des différents travaux témoigne de l'absence d'études basées sur des données réelles d'accidents ferroviaires (retour d'expérience) pouvant conforter ou infirmer l'importance des notions de chronobiologie de la vigilance dans la genèse d'erreurs à l'origine des accidents.

Pourtant le régime de rotation de l'horaire de travail des opérateurs humains dans ce domaine pose le problème du travail posté et la prise en compte des données chronobiologiques peut améliorer la sécurité en proposant des solutions d'adaptation des horaires de travail aux variations circadiennes des capacités fonctionnelles de l'opérateur humain (OH).

La détermination des horaires de meilleure performance de l'OH et leur concordance avec ses horaires de travail améliorent la fiabilité du système Homme-Machine et réduisent ainsi le risque d'accident. Des études ciblées dans ce domaine sont encore

nécessaires pour enrichir nos connaissances et pour mieux adapter le travail à l'opérateur humain.

Bien que l'approche chronobiologique ait été illustrée dans le domaine du travail (posté ou de nuit) et en accidentologie (les pics d'accidents coïncident avec des horaires de basse vigilance et de propension au sommeil), elle n'a pas été mise en œuvre dans la sécurité des transports ferroviaires.

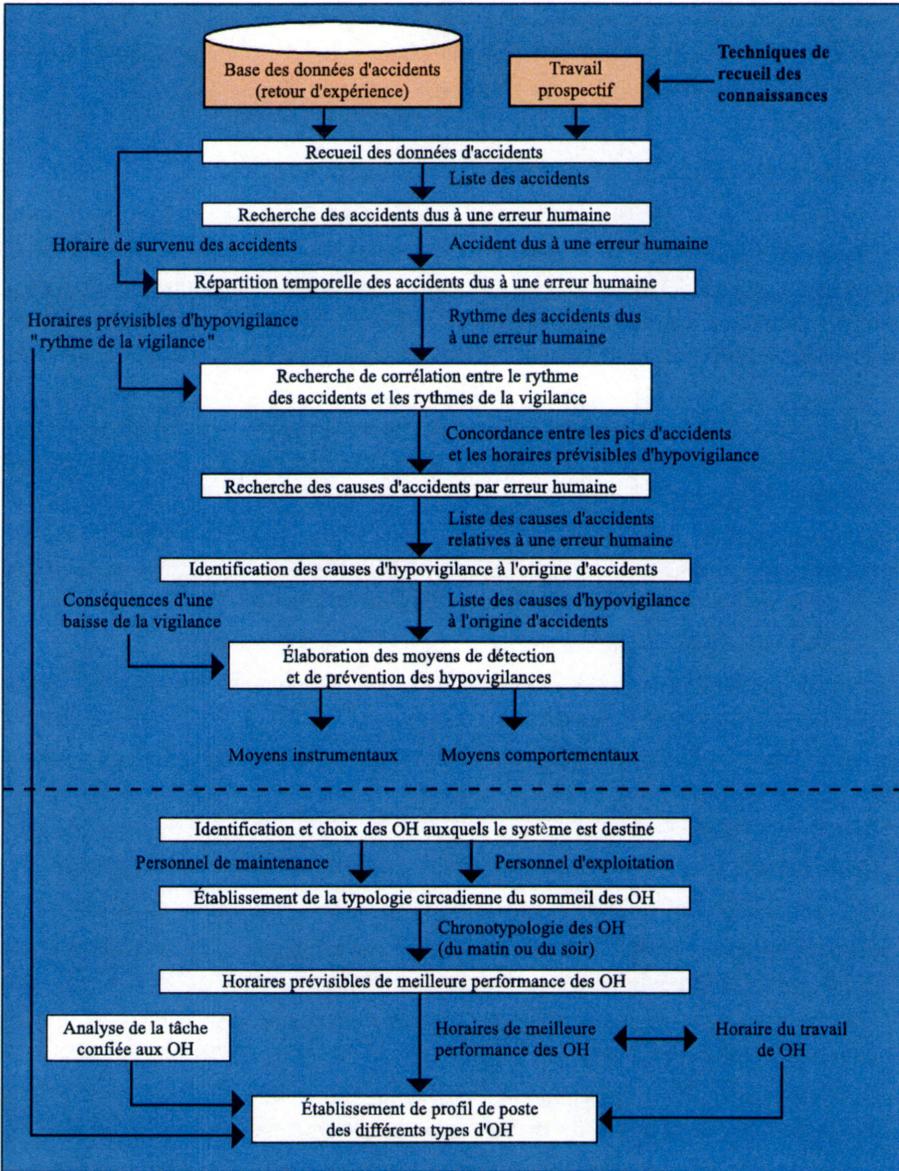
Principe général de la méthode proposée

L'amélioration de la fiabilité humaine dans ce domaine nécessite la prise en compte des facteurs susceptibles d'influencer les performances en situation nominale ou dégradée. Le niveau de vigilance conditionne les performances et son altération est une source importante d'accidents et incidents. L'approche chronobiologique de ce facteur est intéressante à considérer dans le secteur critique de la sécurité des transports ferroviaires guidés.

L'application de cette approche, de manière systématique, dans le domaine des transports ferroviaires nécessite le passage par les 12 principales phases d'analyse chronologique suivantes (figure 1).

1. Le recueil des données d'accidents à partir d'une base de données (retour d'expérience) et/ou d'un travail prospectif à l'aide des techniques de recueil des connaissances (questionnaire, interview, analyse de protocole,...) ;
2. L'établissement de la liste des accidents dus à une erreur humaine ;
3. La détermination de la répartition temporelle de ces accidents (rythme des accidents) à partir de leurs horaires d'occurrence ;
4. La recherche d'une corrélation entre les horaires prévisibles d'hypovigilance (rythmes de la vigilance) et les pics d'occurrence des accidents dus à une erreur humaine (rythme des accidents) ;
5. L'établissement de la liste des causes d'accidents relatives à une erreur humaine ;
6. L'identification des différentes causes d'hypovigilance à l'origine d'accidents ;
7. L'élaboration des moyens instrumentaux et comportementaux de détection et de prévention des hypovigilances de l'opérateur humain (OH) ;
8. L'identification et le choix des OH (personnel de maintenance ou d'exploitation) auxquels le système est destiné ;
9. La détermination de la typologie circadienne du sommeil des OH choisis afin d'établir leur chronotype « du matin » ou « du soir » ;
10. La recherche de leurs horaires de meilleure performance en fonction du critère de matinalité – vespéralité ;
11. L'analyse de la tâche confiée à ces OH ;
12. L'établissement du profil de poste des différents types des OH en soulignant la nécessité de concordance entre leurs horaires de travail avec ceux de meilleure performance.

Figure 1 : Démarche d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des systèmes de transports ferroviaires guidés



La figure 1 synthétise l'ensemble des étapes précédemment évoquées, et qui font l'objet de nos travaux de recherches actuelles.

Recueil de données des accidents

Le recueil de données des accidents peut s'effectuer à partir d'une base de données (retour d'expérience) et ou à travers un travail prospectif grâce aux techniques de recueil des connaissances (Hadj-Mabrouk 1992).

1. Le retour d'expérience

Le retour d'expérience étudie ce qui se passe dans les situations analogues existantes et recense et analyse les incidents d'exploitation. Ce recueil fournit des informations utiles aux ergonomes et aux formateurs (que faut-il améliorer dans l'IHM, l'organisation, la formation).

Dans le domaine du trafic aérien, l'existence de l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OACI) dont l'une des missions est de collecter des informations sur les accidents d'avions survenant dans le monde, a conféré très tôt un rôle essentiel à cette notion de retour d'expérience, et a également favorisé l'accès aux informations recueillies.

Dans le domaine des transports ferroviaires guidés, l'accès à l'information est beaucoup plus difficile, chaque société d'exploitation conserve pour elle les observations faites suite à des accidents ou incidents, et ne publie que des informations statistiques de caractère très général. Même les rapports des commissions d'enquête, créées à la suite d'accidents graves, sont souvent difficilement accessibles. D'où l'intérêt des techniques de recueil des connaissances.

2. Etude prospective des accidents

Elle consiste à recueillir les données d'accidents survenant pendant une période (une ou deux années) et à les analyser. Le recueil peut s'effectuer par interview directement sur le lieu de l'accident ou par le remplissage d'un questionnaire préalablement établi. Le maximum des données doit être colligé (date, heure, causes possibles ou probables, conséquences...).

Recherche des accidents dus à une erreur humaine

Considéré comme un composant principal du système de transport, l'OH est certainement l'élément le plus flexible et le plus compétent. Cependant, il est aussi vulnérable et des erreurs peuvent être commises même par des OH hautement qualifiés. Cette deuxième étape consiste alors à recenser la liste des accidents consécutifs à une erreur de l'opérateur humain dans les transports ferroviaires.

La figure 2 donne un exemple de classification d'un accident potentiel relatif à la collision (Hadj-Mabrouk 1995a). Cette classification est issue d'un travail d'analyse et de structuration des connaissances spécifiques des analyses préliminaires de risques d'un certain nombre de systèmes de transports automatisés tels que MAGGALY, VAL ou TGV nord.

La figure 3 présente un exemple d'erreur humaine pouvant être la cause d'un accident potentiel de type collision par rattrapage entre trains.

Figure 2 : Exemple de classification d'un accident potentiel de type collision (Hadj-Mabrouk 1995a)

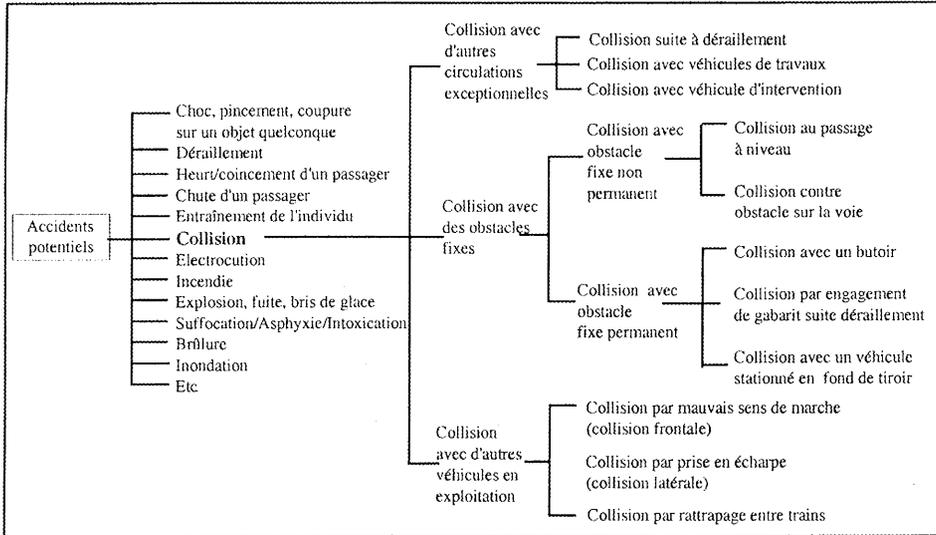
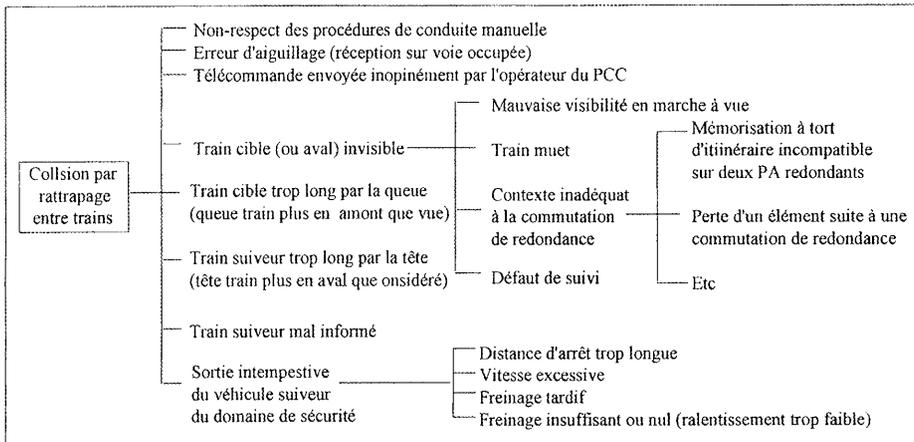


Figure 3 : Exemple d'erreur humaine impliquée dans un accident potentiel : collision par rattrapage entre trains (Hadj-Mabrouk 1995)



Répartition temporelle des accidents dus à une erreur humaine

Certains travaux consacrés aux accidents dus à une erreur humaine suggèrent que ces accidents ne surviennent pas aléatoirement au cours de la journée mais présentent fréquemment des pics à des heures déterminées. Le maximum de risque coïncide souvent avec les horaires de baisse de performance de l'OH, ce qui explique la fréquence augmentée des erreurs et des accidents routiers ou industriels (Chernobyl, Three Mile Island, etc.) à cette période du nyctémère.

La troisième étape consiste à établir la répartition des accidents dus à une erreur humaine. L'analyse temporelle permettra d'établir les répartitions horaires durant le nyctémère, hebdomadaire, mensuelle, saisonnière et annuelle. Ceci permet de dégager d'éventuels pics d'occurrence de ces accidents non aléatoires.

Recherche d'une corrélation entre le rythme de ces accidents et les rythmes de la vigilance

La vigilance de l'OH et sa performance fluctuent au cours du nyctémère en passant par des niveaux élevés et bas. Plusieurs études ont montré une dégradation de la performance humaine en milieu de l'après-midi (heure de la sieste) et tard la nuit et tôt le matin (période de forte propension au sommeil).

De ce fait, les horaires d'occurrence des accidents dus à une erreur humaine relative à l'hypovigilance, sont souvent compatibles avec le pattern circadien de la somnolence ; ce qui prouve l'existence d'une étroite corrélation entre les rythmes de la vigilance et celui de ces accidents.

Cette étape vise à mettre en évidence la concordance qui existe entre les pics des accidents ferroviaires et les horaires prévisibles d'hypovigilance de l'OH dans ce domaine.

Recherche des causes d'accidents relatives à une erreur humaine

Cette étape consiste à identifier les différentes causes d'accidents consécutifs à une erreur de l'opérateur dans le domaine de sécurité de transport ferroviaire.

Les erreurs humaines dans ce domaine concernent notamment deux types d'opérateurs (OH du PCC et ADC). Les erreurs potentielles de l'opérateur au PCC sont souvent relatives au non respect des procédures d'accostage, d'initialisation ou d'évacuation. Les erreurs potentielles de l'opérateur de conduite se répartissent généralement en deux grandes classes : le non respect de la signalisation (franchissement de signal d'arrêt, non respect des feux) et l'erreur de commande ou de manœuvre (freinage intempestif ou brusque, non respect de la consigne de vitesse, ouverture prématurée ou intempestive des portes).

Les figures 4, 5 et 6 proposent trois exemples de classification d'erreurs humaines potentielles provoquées par le personnel d'exploitation (Hadj-Mabrouk 1998).

Figure 4 : Exemples d'erreurs potentielles provoquées par l'opérateur de conduite (Hadj-Mabrouk 1998)

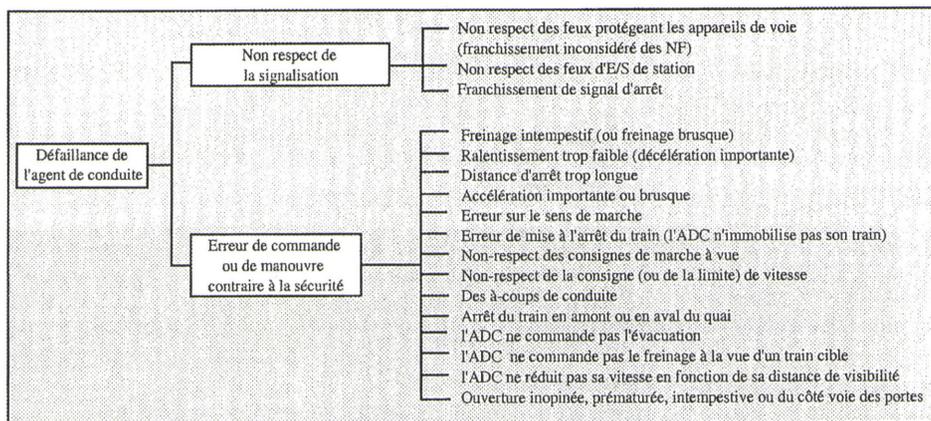


Figure 5 : Exemples d'erreurs potentielles provoquées par l'opérateur au PCC (Hadj-Mabrouk 1998)

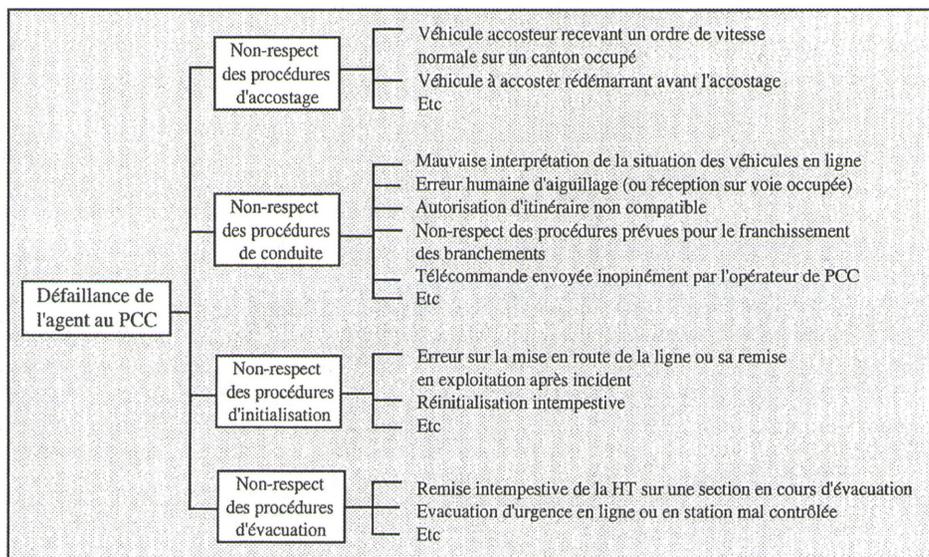
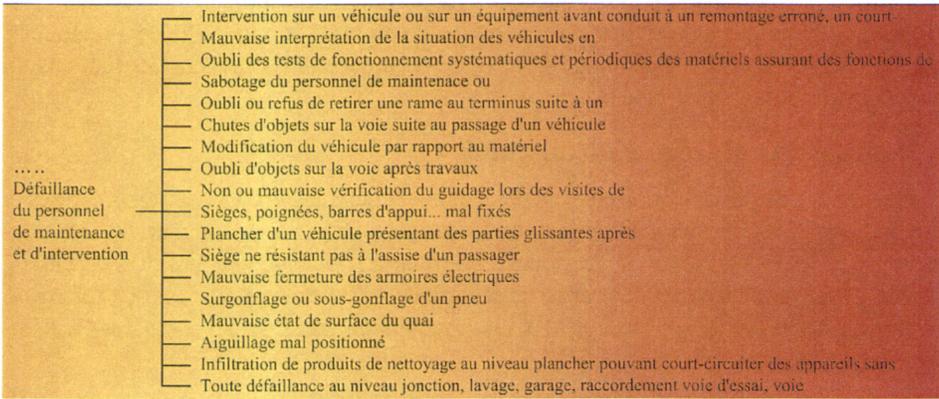


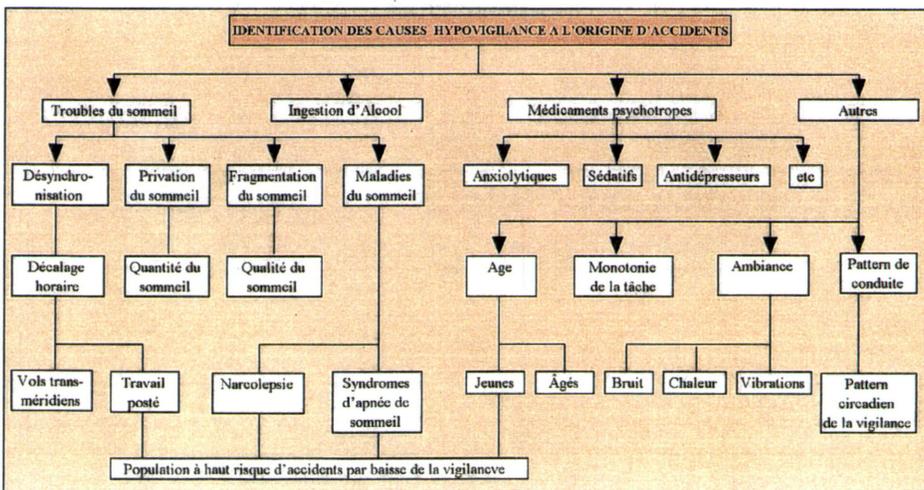
Figure 6 : Exemples d'erreurs potentielles provoquées par l'opérateur de maintenance (Hadj-Mabrouk 1998)



Identification des causes d'hypovigilance à l'origine d'accidents

Cette étape consiste à recenser les différentes causes d'accidents relatives à une baisse de la vigilance de l'opérateur humain. Les principales causes d'hypovigilance sont : les troubles de sommeil, l'ingestion d'alcool et la prise de médicaments psychotropes. Les troubles du sommeil intègrent la dette de sommeil, la fragmentation du sommeil, la désynchronisation et la pathologie du sommeil (figure 7).

Figure 7 : Principales causes d'hypovigilance



Elaboration des moyens de détection et de prévention de l'hypovigilance

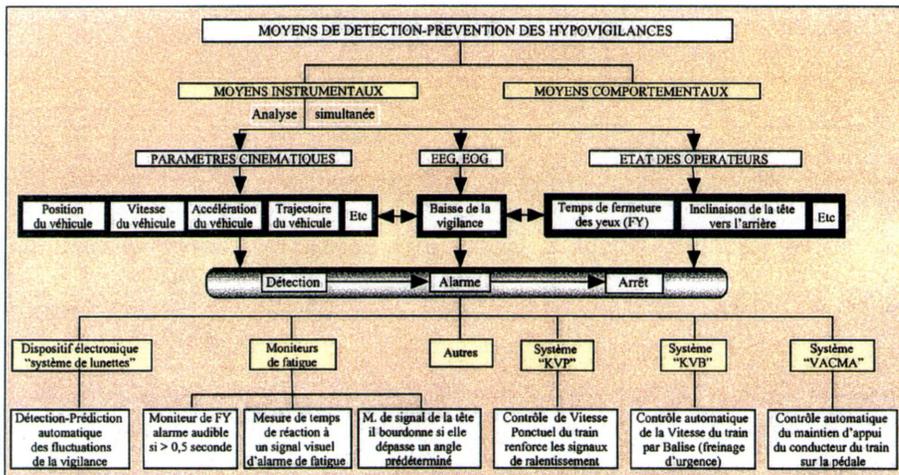
Cette phase de l'approche s'attache à déterminer les moyens et les mesures nécessaires pour détecter et prévenir la baisse de niveau de vigilance de l'opérateur humain. Généralement, on distingue deux types de moyens : les moyens instrumentaux et les moyens comportementaux.

1. Les moyens d'ordre instrumental

Ce sont des dispositifs qui analysent de manière simultanée les données cinématiques, les paramètres électro-physiologiques et l'état de l'OH. Ils permettent de détecter une baisse de la vigilance et de donner une alarme visuelle ou auditive. D'autres systèmes peuvent déclencher l'arrêt automatique du véhicule en cas de manque d'attention de l'OH, le VACMA et le KVB (système de contrôle de vitesse par balise) (figure 8).

Le principe général de fonctionnement du système KVB est le suivant : à partir des informations sur l'état de la signalisation contenues dans des balises installées à proximité des signaux, captées et transmises au calculateur à l'aide d'une antenne réceptrice-émettrice installée sous l'engin moteur, le calculateur installé à bord de l'engin moteur surveille en permanence la vitesse réelle du train, veille à ce que celle-ci soit toujours compatible avec la vitesse maximale autorisée et permette l'arrêt (freinage d'urgence) ou le ralentissement du train, compte tenu des caractéristiques propres du train et de l'état de la signalisation.

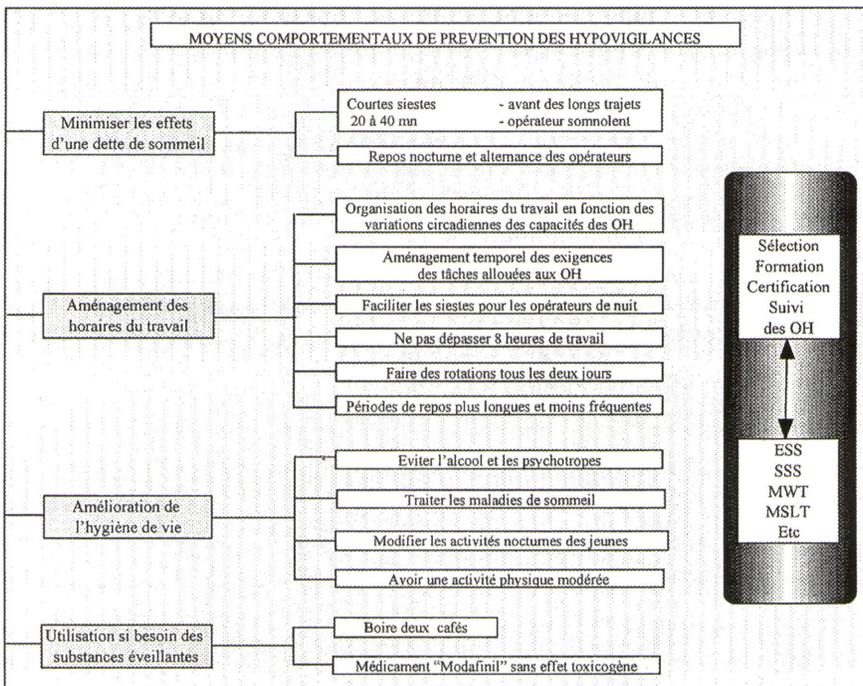
Figure 8 : Principaux moyens instrumentaux de détection d'hypovigilance (Hadj-Mabouk 1999)



2. Les moyens d'ordre comportemental

Ils visent à éviter tous les facteurs de dégradation du niveau de vigilance de l'OH et consistent notamment à améliorer l'hygiène de vie, à aménager les horaires de travail, à minimiser les effets d'une dette de sommeil et à utiliser, si besoin, des substances éveillantes si besoin (figure 9).

Figure 9 : Principaux moyens comportementaux de prévention d'hypovigilance (Hadj-Mabouk 1999)



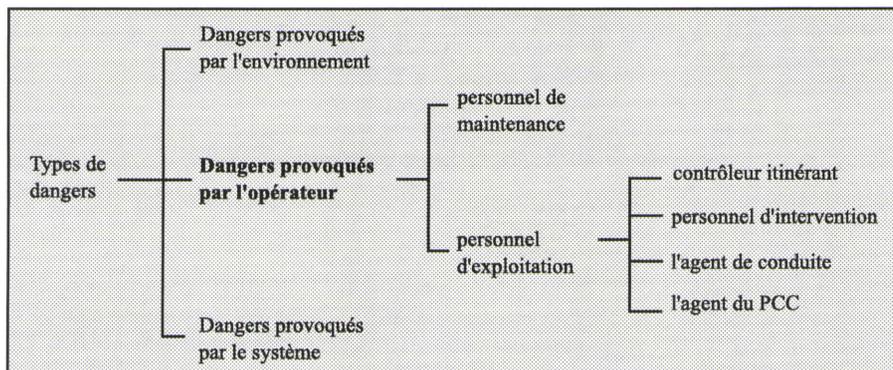
Identification et choix des opérateurs auxquels le système est destiné

Dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires on distingue généralement des opérateurs de maintenance et des opérateurs d'exploitation (agent de conduite, opérateurs au PCC, contrôleur itinérant et personnel d'intervention) (figure 10).

Cette phase suppose le passage par la sélection, la formation, la certification et le suivi des opérateurs humains sur le plan d'aptitude de travail en fonction des facteurs intellectuels, psychomoteurs, comportementaux et attentionnels et compte tenu des exigences du métier en termes de sécurité.

L'originalité de l'approche chronobiologique dans ce contexte réside dans le choix des opérateurs en fonction du critère « sommeil » en termes de quantité, qualité et typologie circadienne.

Figure 10 : Les différents OH des transports ferroviaires (Hadj-Mabrouk 1998)



Etablissement de la typologie circadienne du sommeil de ces opérateurs

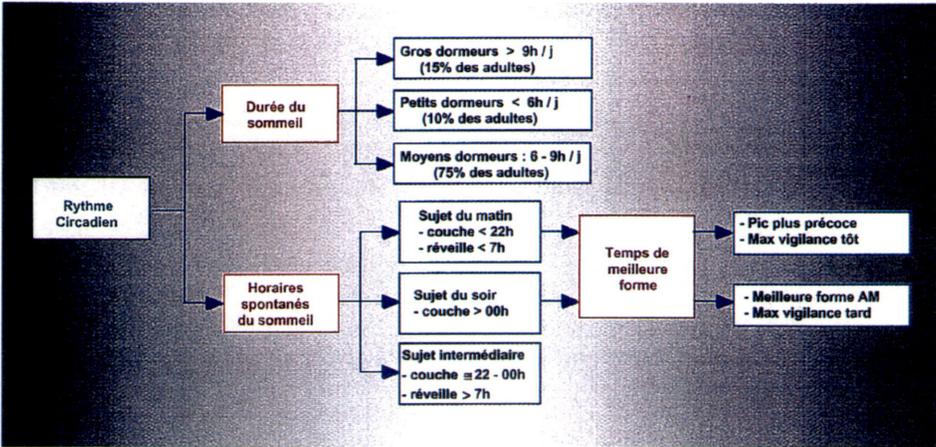
Diverses études suggèrent que le cycle veille-sommeil se caractérise par deux paramètres essentiels, la durée du sommeil et ses horaires spontanés habituels (endormissement et réveil). Les individus se répartissent différemment selon ces deux paramètres qui sont à l'origine d'une véritable typologie du sommeil.

En pratique on définit trois chronotypes selon les horaires spontanés du sommeil : les sujets du matin (type matin) qui se couchent tôt et se réveillent tôt, les sujets du soir (type soir) qui se couchent tard mais se trouvent obligés de se lever tôt pour travailler et les sujets intermédiaires.

Les horaires des maxima de vigilance de ces opérateurs sont différents selon la dimension de matinalité-vespéralité. Cette dernière est une caractéristique individuelle régie par le système circadien.

Cette étape consiste à établir la typologie circadienne du sommeil des opérateurs choisis afin de déterminer leurs horaires prévisibles de meilleure performance (figure 11). Des questionnaires standardisés et validés sont disponibles (Horné et Osberg...)

Figure 11 : Typologie circadienne du sommeil et temps de meilleure forme des OH



Détermination des horaires de meilleure performance des opérateurs humains

Les temps de meilleure forme des différents chronotypes « Matin/Soir » des opérateurs choisis sont nettement décalés dans la journée. Les sujets du matin ont un pic plus précoce, les sujets du soir sentent qu'ils sont en meilleure forme l'après-midi. Les matinaux sont plus attentifs le matin et les vespéraux le soir. Les matinaux sont plus efficaces en termes de précision dans l'exécution de la tâche et les vespéraux en termes de rapidité (figure 11). L'intérêt de cette étape est indéniable pour l'adaptation des horaires du travail à ceux de meilleure performance des OH choisis afin d'améliorer la fiabilité humaine et le niveau de sécurité dans le domaine des transports ferroviaires.

Analyse de la tâche confiée aux opérateurs humains

L'analyse de la tâche confiée aux OH est une étape principale dans la détermination du profil de poste des différents types d'OH. En ergonomie, la tâche traduit un ensemble d'activités coordonnées entre elles (perceptions, décisions et réactions) effectuées pour un but immédiat.

Généralement, on distingue la tâche prescrite (ce que l'on attend de l'opérateur) et la tâche effective ou réelle (ce qu'il fait effectivement). La tâche prescrite est celle qui est définie par celui qui en commande l'exécution et formalisée sous forme documentaire.

Edwards (1973 in Villemeur 1988) propose une classification des tâches de l'opérateur humain : tâches simples (ouvrir une vanne manuelle), tâches complexes (réalisation d'un diagnostic d'accident), tâches de vigilance (détection d'une alarme, d'un signal), tâches de contrôle (surveillance et contrôle d'un processus) et tâches post-incidentelles ou post-accidentelles (activité de l'opérateur après un incident : réponse apprise ou recherche d'une stratégie nouvelle).

L'analyse des tâches est strictement liée à celle de la charge de travail : charge physique (position, efforts physiques, maintien d'un effort,...), charge mentale (complexité, temps de réaction, présentation des informations,...) et cycle de travail (périodes de travail intensif, temps de repos, fatigue).

C'est une technique permettant de décrire les activités des opérateurs humains à un poste de travail. Elle décrit le système dans lequel les tâches sont effectuées, les conditions de travail et les opérations à effectuer. Elle précise ce qui est à faire (De Montmollin 1995).

L'automatisation des systèmes de transports entraîne une baisse de la fréquence d'intervention humaine en régime de fonctionnement normal, la charge globale de l'opérateur étant ainsi réduite. Cependant, en cas de crise, l'opérateur peut être amené à traiter une quantité importante d'informations dans un délai très court, et se trouver ainsi en surcharge de travail.

Cette irrégularité de la charge de travail peut avoir des conséquences inattendues. En effet, à court terme, l'opérateur connaît des difficultés pour s'adapter à un changement brusque du rythme de travail, et le manque de concentration peut l'amener à la panique, ce qui constitue un facteur important d'erreurs de décision. A long terme, la baisse de la fréquence d'intervention peut réduire la capacité de réaction de l'opérateur et dégrader ses connaissances conceptuelles.

Lors de cette phase de l'étude, l'objectif consiste à rechercher un compromis entre ce que l'opérateur humain doit faire et ce qu'il peut ou accepte de faire en tenant compte de la variabilité et de l'hétérogénéité de l'opérateur humain. Cette tâche suppose le passage par les principales étapes suivantes :

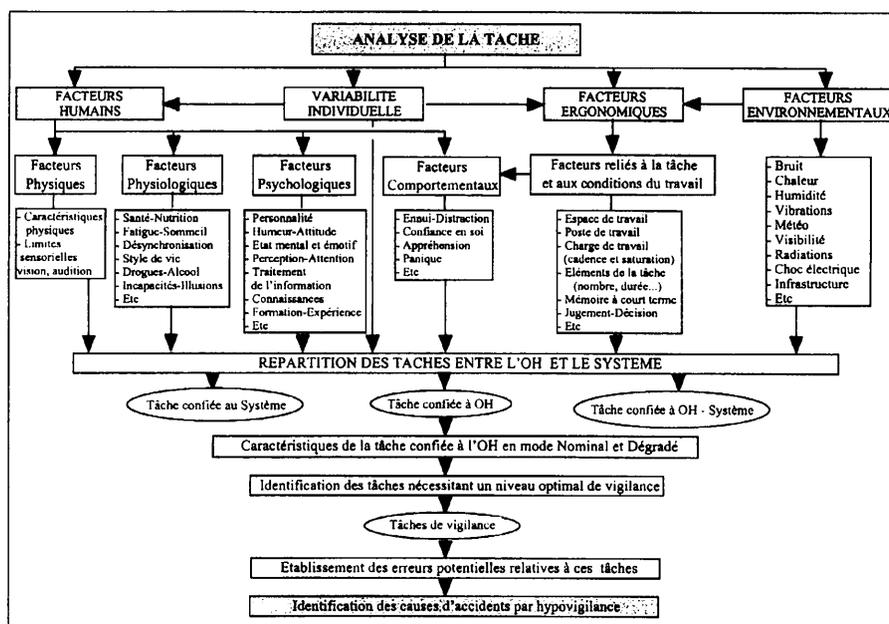
- Choix d'un ou plusieurs types de coopération Homme-Machine
- Etude des approches usuelles de répartition des tâches Homme-Machine dans le domaine des transports guidés
- Elaboration de critères de répartition des tâches en mode nominal et en mode dégradé selon
 - le type d'équipements : Bord, Sol, transmission,
 - le type de fonctions du système : fonctions de sécurité, fonctions de surveillance, fonctions de disponibilité,
 - le type de tâches : simple, complexe, de vigilance, de contrôle, post-incidentelles, post-accidentelles,...
 - le type d'opérateur humain : Agents de PCC, Agents de conduite, Personnel de maintenance,...
- Identification et classification des tâches confiées aux opérateurs humains ;
- Elaboration d'une approche de répartition des tâches de travail entre l'opérateur humain et le système de transport. Cette étape nécessite en premier lieu l'identification des principaux rôles de l'opérateur dans l'exploitation du système ainsi que le recensement des différents modes de conduite couramment employés

dans les transports ferroviaires (conduite automatique intégrale, conduite en pilotage automatique, conduite manuelle contrôlée, conduite manuelle libre, conduite en marche à vue, etc.).

Toute tâche nécessite un niveau optimum de vigilance en deçà et au delà duquel la performance chute, ce qui peut être à l'origine d'erreurs et d'une baisse de la fiabilité.

La figure 12 propose une approche d'identification des principaux facteurs impliqués dans l'analyse de la tâche (humains, ergonomiques et environnementaux) et se déroule en 4 étapes successives : caractérisation des tâches confiées à l'OH en mode nominal et dégradé, identification des tâches nécessitant un niveau optimal de vigilance, établissement des erreurs potentielles relatives à ces tâches et enfin identification des causes d'accidents par hypovigilance.

Figure 12 : Les principaux facteurs impliqués dans l'analyse de la tâche



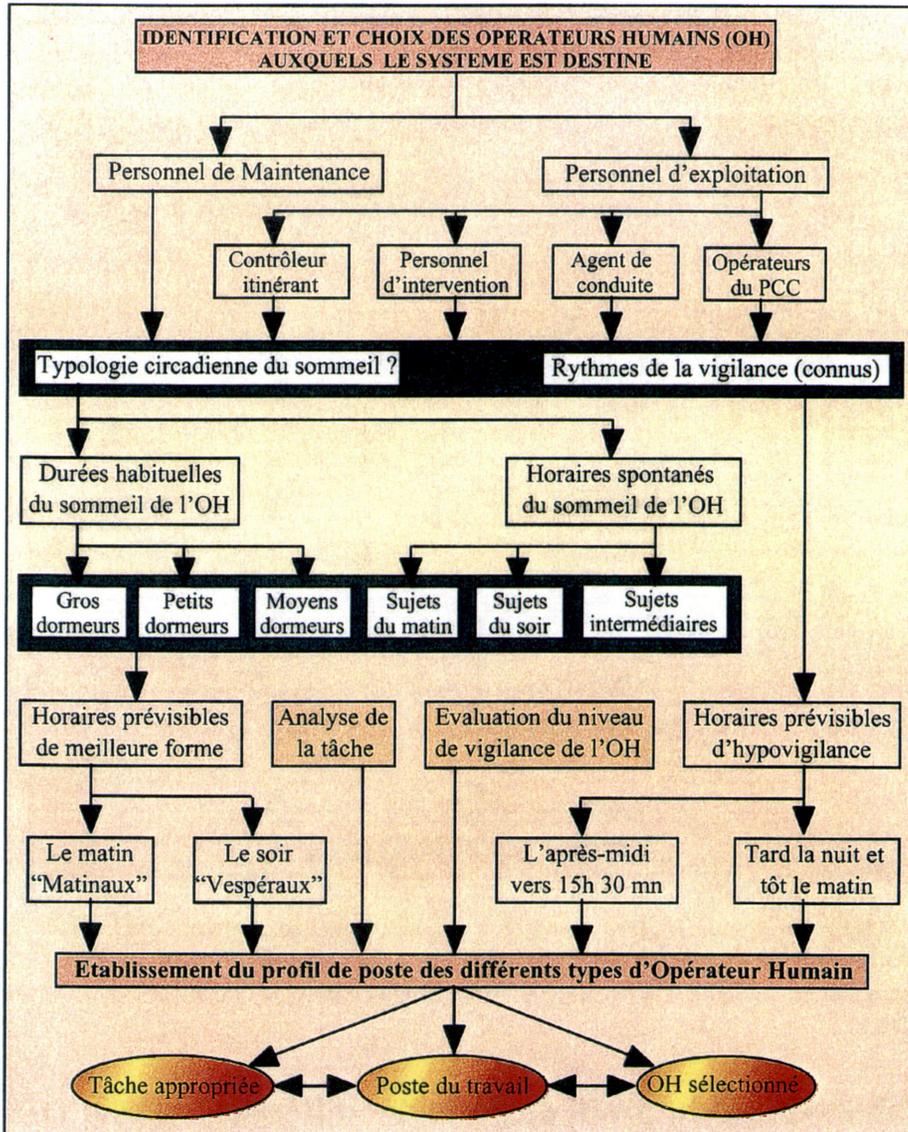
Après avoir abordé les principaux facteurs impliqués dans l'analyse de la tâche, la dernière étape de l'approche proposée consiste à établir le profil du poste des différents types d'OH en soulignant la nécessité du respect de la typologie circadienne du sommeil de ces OH.

Etablissement du profil de poste des différents types d'OH

Le profil du poste de l'OH traduit le résultat des différentes interactions entre les caractéristiques de la tâche, les conditions du travail et les horaires prévisibles d'hypovigilance et de meilleure performance. La concordance entre les horaires du

travail et les horaires de meilleure forme de l'OH contribue à l'amélioration de la fiabilité humaine et à la baisse de niveau de risque. La démarche proposée pour établir le profil de poste des différents OH dans les transports ferroviaires est illustrée par la figure 13.

Figure 13 : Démarche d'établissement du profil de poste des différents types d'opérateur humain



Conclusion

En dépit de quelques limites inhérentes notamment à la phase d'extraction et d'analyse des données d'accidents à partir du retour d'expérience qui mérite une réflexion plus approfondie, cette approche permet de structurer les connaissances relatives à la chronobiologie de la vigilance.

Elle offre un cadre méthodologique pour l'analyse et l'évaluation de l'hypovigilance en relation avec la sécurité des transports. Elle constitue donc un premier pas vers l'introduction de la chronobiologie de la vigilance dans le domaine de la sécurité des transports guidés.

En outre, cette démarche dépasse le seul cadre des transports terrestres et pourrait fort bien s'appliquer à d'autres domaines où l'on exige une sécurité absolue et un niveau optimal de vigilance (aérien, industrie nucléaire,...).

Néanmoins, cette démarche fait encore l'objet de nos travaux de recherche actuels et nécessite sa mise en œuvre dans des conditions industrielles réelles, afin de valider et, le cas échéant, d'améliorer ce qui demeure une proposition.

Conclusion générale

L'homme demeure un élément clé dans la sécurité des systèmes de transport terrestre. L'amélioration de sa fiabilité passe par l'analyse des ressorts psychologiques et la compréhension des mécanismes cognitifs sous tendant son action. Ceux-ci requièrent, pour se dérouler efficacement, un niveau optimal de vigilance garantissant une meilleure performance.

En neurophysiologie, la vigilance est définie par des niveaux d'activation du système nerveux soumis à des variations de type circadien, ultradien et circasémidienn au cours du nyctémère. L'analyse des rythmes de la vigilance (chronobiologie de la vigilance) chez l'homme montre que les épisodes d'hypovigilance apparaissent à des horaires prévisibles de la journée.

L'insécurité dans le domaine des transports terrestres demeure un enjeu important. L'analyse des accidents dans ce domaine a souligné la part du facteur humain dans leur genèse. L'erreur humaine liée à une baisse de la vigilance en est une des principales causes.

L'accroissement du nombre des accidents par hypovigilance, malgré l'amélioration de l'infrastructure, et l'importance des dégâts humains et socio-économiques ont motivé plusieurs auteurs à étudier la vigilance sous divers aspects (neurophysiologiques, facteurs de dégradation, moyens de détection et mesures de prévention).

Plusieurs dispositifs de détection et de prévention de l'hypovigilance du conducteur ont été proposés, mais ces derniers demeurent à l'heure actuelle inopérants. La meilleure solution pour prévenir ce phénomène reste, autant que faire se peut, le respect individuel du rythme veille/sommeil qui s'avère une mesure plus facile et plus efficace pour améliorer la sécurité dans les transports.

Plusieurs études soulèvent l'ampleur du problème posé par l'erreur humaine dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires guidés. Et pourtant, la première journée, en France, consacrée à la place des facteurs humains dans ce domaine, s'est déroulée le 19 septembre 2000. De plus, il n'existe à ce jour, et à notre connaissance, aucune étude basée sur des données réelles d'accidents ferroviaires (retour d'expérience) pouvant conforter ou infirmer l'importance des notions de chronobiologie de la vigilance dans la genèse d'erreurs à l'origine des accidents.

Pour apporter un élément de réponse à ce problème, notre contribution porte essentiellement sur la proposition d'une approche méthodologique d'application de la chronobiologie de la vigilance au domaine de la sécurité des transports ferroviaires guidés.

Cette approche, qui est inspirée notamment des données et des résultats issus de l'analyse des accidents routiers par hypovigilance du conducteur, fait intervenir douze grandes étapes complémentaires détaillées dans le dernier chapitre de ce rapport.

En dépit de quelques limites inhérentes notamment à la phase de recueil et d'analyse des données d'accidents à partir du retour d'expérience qui mérite une réflexion plus approfondie, cette approche permet de structurer les connaissances relatives à la chronobiologie de la vigilance. Elle offre un cadre méthodologique pour l'analyse et l'évaluation de l'hypovigilance en relation avec la sécurité ferroviaire.

Cette démarche dépasse le seul cadre des transports ferroviaire et pourrait fort bien s'adapter à d'autres domaines où l'on exige une sécurité absolue et un niveau optimal de vigilance.

Néanmoins, cette démarche fait encore l'objet de nos travaux de recherche actuels et nécessite sa mise en œuvre dans des conditions industrielles réelles, afin de valider et, le cas échéant, d'améliorer ce qui demeure une proposition.

Bibliographie

- AKERSTEDT T. et al ; The subjective meaning of good sleep, an intraindividual approach using the Karolinska Sleep Diary ; *Percept Mot Skills* 1994 ; 79 : 287-96
- AKERSTEDT T. Work hours, Sleepiness and the underlying mechanism, *J Sleep Res* 1995, 4 (2) : 15-22
- AKERSTEDT T ; Work hours, sleepiness and accidents : introduction and summary ; *J Sleep Res* 1995 ; 4 (2) : 1-3
- AKERSTEDT T. Work hours and Sleepiness ; *Neurophysiol Clin* 1995, 25 : 367-75
- AKERSTEDT T. et FOLKARD S ; Predicting duration of sleep from the three process model of regulation of alertness. *Occupational and Environmental Medicine* 1996, 53 : 136-141
- AKERSTEDT T. et FOLKARD S ; The three-process model of alertness and its extension to performance, sleep latency, and sleep length. *Chronobiology International* ; 1997, 14 (2) : 115-123
- ALDRICH M. Automobile accidents in patients with sleep disorders ; *Sleep* 1989 ; 12 (6) : 487-94
- ALPERT M. et al. Sleep-disordered breathing and car accidents in the elderly, *J Sleep Res* 1992, 21 : 167
- AMALBERTI R. et MOSNERON-DUPIN F ; Facteurs humains et fiabilité. Quelles démarches pratiques ? Editions Octarès ; 1997 ; 136
- AMARA H ; Typologie générale des accidents de la voie publique reçus aux deux CHU de Sousse en 1992 ; Thèse de Médecine Sousse 1994
- ANDERSON K.J. Arousal and the Inverted-U-hypothesis : A critique of Neiss's reconceptualising Arousal. *Psychological Bulletin*, 1990, 107, 1 : 96-100
- ANSSEAU M. et TIMSIT-BERTHIER M. Vigilance et troubles psychiatriques ; *Neuro - Psy*, vol 2, n° 2, 1987, p : 105-110
- BALL K et al ; Driving avoidance and functional impairment in older drivers. *Accid Anal Prev* 1998 May ; 30 (3) : 313-22
- BEN HAMMOUDA S ; Les passagers de véhicules légers accidentés de la voie publique au cours de l'année 1992 dans la région de Sousse. Typologie - Bilan lésionnel ; Thèse de Médecine Tunis 1994
- BENOIT O. Rythme Veille-sommeil et modes d'existence. *Revue du Prat* 1976, 26, 27 p : 1945-54
- BENOIT O. et AGUIRRE A. Homeostatic and circadian aspects of sleep regulation in young poor sleepers ; *Neurophysiol Clin* 1996 ; 26 : 40-50
- BERRICHI H. et al. Détection de la vigilance, enregistrement simultané des signaux EEG et EOG ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; 143-150

- BERRICHI H. et al. Quantification objective et subjective des troubles de la vigilance en situations réelles de conduite ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 405-413
- BILLARD M. Médicaments psychotrope et vigilance ; *Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière* ; Journée spécialisée INRETS, 27 octobre 2000
- BONNET M.H. Effects of sleep disturbance on sleep, performance and mood ; *Sleep* 1985, 8 (1) : 11-19
- BONNET MH. Sleep fragmentation as the cause of daytime sleepiness and reduced performance ; *Wien Med Wochenschr* 1996, 146 (13-14) : 332-34
- BORBELY A ; A two process model of sleep regulation ; *Human Neurobiology*, 1982, 1, : 195-204
- BOUGRINE S. et al. Sleep and fatigue in rapid rotation : Effects of Morningness Eveningness type, age and sex for highway operators ; *Chronobiology International*, 1997, 14 (suppl 1) : 22
- BOUSSUGE J. et LAFONT R. Quinze ans de sécurité sur autoroute. Bilan et perspectives ; *Revue générale des routes et des sérodromes* 1995, n° 726, p : 57-64
- BROMAN J.E. et al ; Insufficient sleep in the general population ; *Neurophysiol Clin* 1996 ; 26 : 30-9
- BROOKHUIS K. Driver impairment monitoring system ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 287-295
- BROUGHTON R. et al ; Life effects of narcolepsy in 180 patients from North America, Asia and Europe compared to matched controls ; *Canadian Journal of Neurological Science* 1981 ; 8 : 299-304
- BROUGHTON R. et al ; Comparison of the psychosocial effects of epilepsy and narcolepsy/cataplexy : a controlled study ; *Epilepsia* 1984 ; 25 : 423-33
- BROUGHTON R. Les rythmes biologiques de la vigilance et du sommeil-éveil chez l'homme sain et malade. *Psychologie Médicale*, 1989, 21, 1 : 49-55
- BROWN I. Drive fatigue ; *Hum Factors* 1994 ; 36 (2) : 298-314
- BRUNI H. Catégories temporelles et fluctuations diurnes de l'attention ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 397-404
- BUGGE et al ; Changes in the circadian rhythm of performance and mood in healthy young men exposed to prolonged, heavy physical work, sleep deprivation, and caloric deficit. *Aviation, Space, and environmental Medicine* 1979/7 : 663-668
- BUYSSE D. et al ; The Pittsburgh Sleep quality Index : a new instrument for psychiatric practice and research ; *Psychiatry Res* 1989 ; 28 : 193-213
- CABON PH. et al ; Sommeil et vigilance des conducteurs de train ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 221-228

- CARSKADON M. Adolescent sleepiness : increased risk in a high-risk population ; *Driving* 1990 ; 5 (4)/6 (1) : 317-28
- CARSKADON M. et DEMENT WC ; Cumulative effects of sleep restriction on daytime sleepiness ; *Psychophysiology* 1981 ; 18 : 107-13
- CARSKADON M. et al ; Guidelines for the Multiple Sleep Latency Test : a standard measure of sleepiness ; *Sleep* 1986 ; 9 : 519-24
- CARSKADON M. et DEMENT WC ; Daytime sleepiness : quantification of a behavioral state ; *Biobehav Rev* 1987 ; 11 : 307-17
- CARSKADON M. et ROTH T ; Sleep restriction. In : *sleep, sleepiness and performance*. Monk T ; John Wiley & sons ; Ed Chichester : 1991. pp. 155-67
- CASSEL W. et al. Risk of traffic accidents in patients with sleep-disordered breathing : reduction with nasal CPAP ; *Eur Respir J* 1996 ; 9 (12) : 2606-11
- Ceytel c ; Risk of traffic accident injury after a prescription for a benzodiazepine ; *Ann Epidemiol* 1995 ; 5 (3) : 239-44
- CASTON J. Les rythmes ; *Psychophysiologie Tome II*. Ed : ELLIPSE 1993, p : 271-319
- CHABROL A. La sécurité routière : un enjeu de santé publique majeure ; *Bulletin de l'Ordre des Médecins* Juin 2000 ; dossier sécurité p 5-16
- CHAPUT D. et al ; Un système embarqué de détection de l'hypovigilance ; *Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 105-112*
- CHARAA N. Typologie du sommeil ; Thèse en Médecine N° 1195, 1998, Fac de Médecine de Sousse (Tunisie)
- CHAN M. et HERRERA A. Détection de la baisse de vigilance par réseau neuronal ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 375-379*
- CHICH Y. Introduction à la journée d'étude sur le maintien de la vigilance dans les transports ; *Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 9-11*
- CIRCULAIRE OACI, 241-AN/145 (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) ; *Automatisation du contrôle de la circulation aérienne, Les facteurs humains dans le contrôle de la circulation aérienne, 1993, 23-30*
- CIRCULAIRE OACI, 249-AN/149, L'automatisation dans les futurs systèmes de navigation aérienne, *Les facteurs humains dans les systèmes CNS/ATM, 1994,11-18*
- CIRCULAIRE OACI, 249-AN/149, Une technologie conçue pour coopérer avec l'homme, *Les facteurs humains dans les systèmes CNS/ATM, 1994, 19-22*
- CIRCULAIRE OACI, 249-AN/149, Les principes d'une automatisation centrée sur l'élément humain, *Les facteurs humains dans les systèmes CNS/ATM, 1994, 23-28*
- CIRCULAIRE OACI, 253-AN/151, Prévention de l'erreur : considérations et stratégies, *Les facteurs humains dans la maintenance et l'inspection des aéronefs, 1995, 37-42*

- COINTOT B. et al ; Vigilance du conducteur automobile sur autoroute ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 349-365
- CORFITSEN M. T ; Enhanced tiredness among young impaired male nighttime drivers ; *Accid Anal Prev* 1996, 28 (2) : 155-62
- CZEISLER C. et al ; Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work ; *N Engl J Med* 1990 ; 322 (18) : 1253-9
- DAURAT A. BENOIT O. et al ; Detrimental influence of bright light exposure on alertness, performance and mood in the early morning ; *Neurophysiol Clin* 1996, 26 (1) : 8-14
- DAVID Y., LE TRUNG B., HADJ-MABROUK H ; L'erreur humaine dans les systèmes de transport guidés ". Journée spécialisée INRETS – L'erreur humaine : question de points de vue ? Centre Reille, Paris 17 novembre 1994, 10p.
- DE DEGIER J.J. Estimation of psychotropic drugs secondary effects on the vigilance ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 101-110
- DE KEYER V ; La fiabilité humaine dans les processus continus rapport introductif « les activités mentales dans les processus de production fortement automatisés », XVII^e journée de la SELF, 1982. *Le travail humain*, tome 45, n°2, 331-339
- DEKEYSER V ; L'erreur Humaine ; *La recherche* 1989, 20, 216 : 1444-1455
- DE MONTMOLLIN M ; Automatisation et aide à l'opérateur, *Vocabulaire de l'ergonomie*, Ed. Octarès, 1995, 36-39
- DE TERSSAC G. et Chabaud C ; Référenciel opératif commun et fiabilité, *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, Ed. Octarès 1990, 111-139
- DINGES DF. et al ; Cumulative sleepiness, mood disturbance, and psychomotor vigilance performance decrements during a week of sleep restricted to 4-5 hours per night. *Sleep* 1997, 20, 4 : 267-277
- DINGES D. et al. Temporal placement of a nap for alertness : contributions of circadian phase and prior wakefulness ; *Sleep* 1987 ; 10 : 313-29
- DINGES D. Adult napping and its effects on ability to function. In : Stampi C, editor, *Why we nap : evolution, chronobiology, and functions of polyphasic and ultra-short sleep*. Boston : Birkhauser ; 1992. pp. 118-34
- DINGES D. An overview of sleepiness and accidents ; *Sleep Res* 1995, 4 (2) : 4-14
- DOGUI M ; Chronobiologie de la vigilance et des performances et erreur humaine. Application aux systèmes de transports guidés. Rapport de contrat DOGUI/INRETS, service d'explorations fonctionnelles du système nerveux, CHU de Sousse-Tunisie, décembre 1998, 21 p.
- DOUGLAS A. et al ; The Sleep Disorders Questionnaire I : creation and multivariate structure of SDQ ; *Sleep* 1994 ; 17 : 160-7

- DRODZ VERLY C ; Automatiser ? Pourquoi ? Comment ?, Journée Ergonomie et Facteurs Humains dans le transport ferroviaire, Toulouse 2000, 159-168
- DUCLUZEAU R. et al ; Les alcoolémies très élevées ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 81-88
- DUSSAULT C. Le nouveau système graduel à la conduite au Québec : Fondements et résultats préliminaires. R.T.S. n° 67, 2000, p :7-20
- ETARD O. et al ; Effets résiduels et interaction avec l'alcool d'une prise unique de 10 mg de Zolpidem évalués sur simulateur de conduite ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 163-171
- FAKHAR S. et al ; La posture corporelle comme indicateur de fatigue du conducteur ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 151-157
- FAYADA C. et COUTIER L. Les capacités d'attention des conducteurs de train, Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 213-219
- FERCHICHI H ; Les accidents de trajet gérés par la commission médicale du centre : Etude analytique ; Thèse en Médecine n° 1160 Sousse ; 1998
- FERNANDEZ G. et CLOT Y ; Rôle collectif de travail dans la sécurité des circulations à la SNCF : le cas d'un dépôt de banlieue en région parisienne ; Revue Générale des Chemins de Fer, Éditions ELSEVIER, Paris, décembre 2000, pp 69-76.
- FEYER AM. Et al ; Balancing work and rest to combat driver fatigue : an investigation of two-up driving in Australia ; *Accid Anal Prev* 1997, 29 (4) : 541-53
- FINDLEY L. et al ; Driving simulator performance in patients with sleep apnea ; *Am Rev Respir Dis* 1989 ; 140 : 529-30
- FINDLEY L ; Vigilance and automobil accidents in patients with sleep apnea or narcolepsy ; *Chest* 1995 ; 108 (3) : 619-24
- FLAGES M. et CHURCHILL G ; La quantification des métiers de sécurité à la RATP par le retour d'expérience. 9ième Colloque national de fiabilité et maintenabilité, France, La Baule, 30 mai-3 juin 1994
- FOLKARD S ; Circadian performance rhythms : some practical and theoretical implications ; *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1990, 327 : 543-553
- FOLKARD S ; Black times : temporal determinants of transport safety ; *Accid Anal Prev* 1997, 29 (4) : 417-30
- FOLKARD S. et TOTTERDELL P ; Recovery from work shifts : how long does it take ? *J Appl Psychol* 1995, 80 (1) : 43-57
- FRÖBERG J. Twenty-four-hour Patterns in Human performance, subjective and physiological variables and differences between Morning type and Evening type Subjects. *Biological Psychology* 1977/5 : 119-134

- FULLER R ; The task-Capability Interface model of the driving process, R.T.S. n° 66, 2000, 47-56.
- GADBOIS C. Dimensions temporelles de l'action et Fiabilité des systèmes socio – techniques. Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes ; Sous la direction de LEPLAT J. et TERSSAC G. Edition Octares entreprise 1990 ; p : 159-187
- GALLAND JP ; Sécurité des transports : questions prospectives à 5 ou 10 ans ; centre de prospective et de veille scientifique, 2000
- GARDER P. et ALEXANDER J. Fatigue related accidents and continuous shoulder rumble strips. Presented at the Transportation Research Board's 74th Annual Meeting ; 1995 January 22-28
- GENGO F. et MANNING C ; A review of the effects of antihistaminies on mental process related to automobile driving ; J Allergy Clin Immunol 1990 ; 86 : 1034-9
- GEORGE et al ; Sleep apnea patients have more automobile accidents ; Lancet 1987 Aug 22 : 447
- GILBERG M ; The effects of a short daytime nape after restricted night Sleep. Sleep 1996, 19 (7) : 570-575
- GRAU J-Y. et AMALBERTI ; Les erreurs d'attention en pilotage d'avion : un problème différent des pertes de vigilance. Vigilance et Transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention. Sous la direction de Michel Vallet et Salah Khardi ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 189-197
- GRIFFITHS R. et al ; Low-dose caffeine discrimination in humans ; J Pharmacol Exp Ther 1990 ; 262 : 970-6
- GRUAU S. et al ; Hypovigilance diurne et dégradation de l'aptitude de conduite automobile chez la personne âgée : Effets de la resynchronisation des rythmes circadiens par l'activité ; « Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière » ; Journée spécialisée INRETS, 27 octobre 2000
- HADJ-MABROUK H ; Apprentissage automatique et acquisition des connaissances : deux approches complémentaires pour les systèmes à base de connaissances ; Thèse de doctorat en automatique industrielle et humaine ; Université de Valenciennes ; décembre 1992
- HADJ-MABROUK H ; La maîtrise des risques dans le domaine des automatismes des systèmes de transport guidés : Le problème de l'évaluation des analyses préliminaires de risques. Revue Recherche-Transport-Sécurité, numéro 49, pp 101-112, France, Décembre 1995.
- HADJ-MABROUK H ; Le besoin d'introduire les facteurs humains dans le développement et l'analyse de sécurité des systèmes de transport guidés. Rapport ESTAS/A-95-30, convention INRETS/DTT, Arcueil, juillet 1995, 55 p.
- HADJ-MABROUK H ; La nécessité de prendre en compte l'erreur humaine dans l'analyse de sécurité et le développement des systèmes de transport guidés ». *OCTARES Éditions*, collection colloques, l'erreur humaine : question de points de vue ? France, pp 85-98, 1996.

- HADJ-MABROUK H ; Projet FACTHUS : prise en compte des facteurs humains dans le développement des projets industriels. Convention INRETS/DTT, rapport n° ESTAS/A-96-65, diffusion restreinte, 73 p, Arcueil, décembre 1996.
- HADJ-MABROUK H ; Acquisition et évaluation des connaissances de sécurité des systèmes industriels. Application au domaine de la certification des systèmes de transport automatisé ; Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches ; Université de technologie de Compiègne ; février 1998
- HADJ-MABROUK et DOGUI M ; Projet FACTHUS : contenu et déroulement du programme envisagé ; Rapport d'étape n° ESTAS/A-98-29, Arcueil 9 octobre 1998, 16 p.
- HADJ-MABROUK H. et al ; Exemple de typologie d'accidents dans le domaine des transports guidés. *Revue Générale des Chemins de Fer*, Éditions Elsevier, Paris, n° 3, mars 1998, pp 17-27.
- HADJ-MABROUK H. et DOGUI M ; Approche d'intégration des facteurs humains dans la sécurité des transports ferroviaires guidés ». *Revue Générale des Chemins de Fer*, Éditions Elsevier, Paris n° 11, novembre 1999 pp17-34.
- HADJ-MABROUK A ; Chronobiologie de la vigilance et des performances appliquée au domaine des transports terrestres ; Thèse de médecine, 1999, Fac de médecine de Sousse-Tunisie
- HADJ-MABROUK H. et DESFRAY P ; Législation et réglementation de la sécurité dans les transports publics guidés ; *Revue Générale des Chemins de Fer*, Éditions Elsevier, Paris n° 7, Août 2000 ; pp11-23.
- HADJ-MABROUK A., HADJ-MABROUK H. et DOGUI M ; Chronobiologie de la vigilance : Approche d'application dans le domaine de la sécurité routière, *Revue Recherche Transports Sécurité*, Éditions ELSEVIER 2001 (à paraître).
- HAGIWARA H. et al ; A study on the quantitative evaluation method of human alertness and its application ; *Seishin Shinkeigaku Zasshi* 1997, 99 (1) : 23-34
- HAMILTON P. et al ; A study of four days partial sleep deprivation. In : Colquhoun W, editor. *Aspects of human efficiency*. London : English Universities Press, Ltd ; 1972. pp. 101-13
- HARALDSON P. et al ; Driving vigilance simulator test ; *Acta Otolaryngol (Stockh)* 1990 ; 110 : 136-40
- HARALDSON P. et al ; Long-term effect of uvulopalatopharyngoplasty on driving performance ; *Arch Otolaryngol Head Surg* 1995 ; 121 (1) : 90-4
- HARMA M ; Individual differences in tolerance to shift work : a review, *Ergonomics* 1993 ; 36 (1-3) : 101-9
- HASELKORN JK et al ; Characteristics of drivers and driving record after traumatic and nontraumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil* 1998 Jul ; 79 (7) : 738-42
- HAWORTH L. et VOLCAN P ; Testing of commercially available fatigue monitors ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 81-103

- HEINTZ J-G. et al ; Vigilance et Attention. Quels rapport avec la sécurité ferroviaire ?
Revue générale des chemins de fer, 1992/11, 11 p : 15-24
- HILL D. et al ; Diurnal variations in reponses to exercise of Morgin type and Evening
type. The Journal of Sports Medecine and physical fitness 1988, 28, 3 :
213-19
- HODDES E. et al ; Quantification of sleepiness : a new approach ; Psychophysiology
1973 ; 10 : 431-6
- JOHNS MW ; A new method of measuring daytime sleepiness : the Epworth Sleepiness
Scale ; Sleep 1991 ; 14 : 540-5
- HORNE J. et BAUMBER C ; Time-of-day effects of alcohol intake on simulated driving
performance in women. Ergonomics 1991 ; 34 (11) : 1377-83
- HORNE J. et GIBBONS H. Effects on vigilance performance and sleepiness of alcohol
given in the early afternoon (post lunch) vs. Early evening ; Ergonomics
1991 ; 34 (1) : 67-77
- HORNE J. et REYNER L ; Driver sleepiness ; J Sleep Res 1995 4 (2) : 23-9
- HORNE J. et REYNER L ; Sleep related vehicule accidents ; BMJ 1995 Mar 4 ;
310 : 565-7
- HU PS et al ; Crash risks of older drivers : a panel data analysis. Accid Anal Prev 1998
Sep, 30 (5) : 569-81
- HUNTLEY M. et CENTYBEAR T ; Alcohol, sleep deprivation and driving speed effects
upon control use during driving ; Hum Factors 1974 ; 16 : 19-28
- JOHNSON L.C. et al ; Quality of slep and performance in the navy : A Longitudinal
study of good and poor sleepers. Raven Press, New York 1983 : 13-28
- JOLY P. et al ; Problèmes de vigilance et stratégies de compensation chez les conducteurs
âgés. Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et préven-
tion ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI. Presses Universitaires
de Lyon 1995, p : 297-315. Washinton, DC : Bureau of National affairs,1992,
BNA special report n°32 : 1-32
- KHARDI S. et al ; La vigilance en conduite automobile réelle : Analyse pseudo-quantitative
des signaux physiologiques et cinématiques ; Vigilance et transports,
aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M.
VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 265-275
- KHARDI S. et HERNANDEZ-GRESS ; Validation d'un nouveau système hybride de
diagnostic de l'état de vigilance du conducteur ; R.T.S. 2000, n° 66, p :101-114
- KESSLER E ; Shift work : family impact and employer responses. Washinton,
DC :Bureau of National affairs,1992, BNA special report n°32 : 1-32
- KNIPLING R. et WANG J. Crashes and fatalities related to driver drwsiness/fatigue.
Research Note from the Office of Crash Avoidance Research. Washington,
DC :National Highway Traffic Safety Administration,1994 Nov 1-8
- KNIPLING R. et WANG J. ; Revised estimates of the US drowsy driver crash problem size
based on general estimates system case reviews. Association for the Advancement
of Automotive Medecine, 39th Annual Proceeding ; 1995 Oct 16-18

- KNIPLING R. et WALTER W ; U. S. IVHS reseach : vehicle-based drowsy driver detection. *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 317-326
- KOZENA L. et al ; *Vigilance impairment after a single dose of benzodiazepines* ; *Psychopharmacology (Berl)* 1995 ; 119 (1) : 39-45
- KRIBBS N. et DINGES D ; *Vigilance decrement and sleepiness*. In : *Sleep onset mechanisms*. Harsh J, Ogilvie R. American Psychological Association ; Washington, DC :1994. pp. 113-125
- KRIPKE DF ; *Ultradian rythms in sleep and wakefulness*. *Advances in Sleep Research*, 1974, 1 : 305-325
- LABIALE GUY ; *Performance de détection visuelle des informations d'alerte dans le véhicule ; Le maintien de la vigilance dans les transports* ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 159-170
- LABIALE GUY ; *L'attention et la charge mentale : Applications aux informations de navigation dans la voiture. Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 249-258
- LAFONT R ; *Un exemple d'enjeu de la vigilance : La circulation sur autoroute ; Le maintien de la vigilance dans les transports* ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 23-29
- LAGARDE D. et al ; *Conséquences d'une perturbation du rythme veille / sommeil ; Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière* ; Journée spécili-sée INRETS, 27 octobre 2000
- LAGIER G ; *Psychotropes et accidents de la route ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, 145-153
- LANGOIS P. et al ; *Temporal patterns of reported single vehicle car and truck accidents in Texas, USA during 1980-83* ; *Chronobiol Int* 1985 ; 2 : 131-40
- LAVIE P. et al ; *Frequency of sleep related traffic accidents and hour of the day* ; *Sleep Res* 1986 ; 15 : 175
- LEGER D. et al ; *Syndromes d'apnées du sommeil et risques accidentels ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 63-70
- LEMOINE P ; *Le mésusage des psychotropes au volant ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 111-119
- LENNE M.G. et al ; *Time of day variations in driving performance* ; *Accid Anal Prev* 1997 Jul, 29 (4) : 431-7
- LENNE M.G. et al ; *Interactive effects of sleep deprivation, time of day, and driving experience on a driving task*. *Sleep* Feb 1 ; 1998 ; vol 21 ; n° 1

- LEVEILLE et al ; Psychoactive medications and injurious motor vehicle collisions involving older drivers ; *Epidemiology* 1994 ; 5 : 591-8
- LEVINE N. et al ; Daily fluctuations in Honolulu motor vehicle accidents ; *Accid Anal Prev* 1995 Dec, 27 (6) : 785-96
- LISPER H. et al ; Relation between time to falling asleep behind the wheel on a closed track and changes in subsidiary reaction time during prolonged driving on a motorway ; *Ergonomics* 1986 ; 29 (3) : 445-53
- LIU JY et al ; Teenage driving fatalities. *J Pediatr Surg* 1998 Jul ; 33 (7) : 1084-8 ; discussion 1088-9
- LORIST M. et al ; Influence of caffeine on selective attention in well-rested and fatigue subjects ; *Psychophysiology* 1994 ; 31 : 525-34
- LUGARESI E. et al ; Good and poor sleepers : an epidemiological survey of the San Marino population. *Sleep Wake Disorders : Naturel History epidemiology and long term evolution* 1983 ; New York (Raven Press) : 1-12
- LUMLEY M. et al ; Ethanol and caffeine effects on daytime sleepiness alertness ; *Sleep* 1987 ; 10 : 306-12
- LUNDBERG C. et al ; Impairments of some cognitive functions are common in crash-involved older drivers. *Accid Anal Prev* 1998 May ; 30 (3) : 371-7
- LYZNIKI JM et al ; Sleepiness, driving, and motor veicle crashes. Council on scientific Affairs, American Medical Association. *JAMA* 1998 Jun 17 ; 279 (23) : 1908-13
- MACAIRE J-P ; Evolution de la sélection du personnel de conduite des trains à la SNCF ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 51-57
- MACAIRE J-P. et FAYARD C ; Le maintien de la fiabilité humaine des conducteurs de train ; un groupe de prévention pluridisciplinaire ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 367-373
- Mc CARTT A. et al ; The scope and nature of the drowsy driving problem in New York State ; *Accident Analysis and Prevention* 1996 ; 28 (4) : 511-17
- MACKIER R. et WYLIE C ; Countermeasures to loss of alertness in truck drivers ; Theoretical and pratical considerations ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 113-141
- Mc GWIN G. et BROWN DB ; Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older driver. *Accid Anal Prev* 1999 May ; 31 (3) : 181-98
- MALATERRE G. et SAAD F ; Les aides à la conduite : définition et évaluation, exemple du radar anti-collision, *Le travail humain*, tome 49, n° 4 / 1986 ; 333-345
- MALATERRE G. et FONTAINE H ; Evaluation à priori des aides au maintien de la vigilance ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p 73-80

- MALYE F ; Sécurité ferroviaire : la fin de l'erreur humaine ; Sciences et avenir, mai 1995, 64-65
- MARTIN E.H. et LEE-GOSSELIN ; Une journée de conduite : Durées et rythmes des trajets automobiles ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 277-286
- MASSON P ; Le maintien de l'éveil des conducteurs de trains ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 59-64
- MAYCOCK G ; Sleepiness and driving : the experience of UK car drivers ; J Sleep Res 1996 ; 5 (220) : 220-37. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1982 ; 53 : 658-61
- MERILL M. et al ; The sleep of long-haul truck drivers. N Engl J Med 1997, 337 : 755-61
- MIKULENCER M. et al ; The Effects of 72 hours of sleep loss on psychological variables. British Journal of Psychology 1989, 80 : 145-162
- MITLER M. et al ; Maintenance of wakefulness test : a polysomnographic technique for evaluating treatment efficacy in patients with excessive somnolence ; Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1982 ; 53 : 658-61
- MITLER M. et al ; Catastrophes, sleep, and public policy : consensus report ; Sleep 1988 ; 11 (1) : 100-9
- MITLER M. et MILLER J ; Methods of testing for sleeplessness ; Behav Med 1996 ; 21 : 171-83
- MITLER M. et al ; The sleep of long-haul truck driver ; N Engl J Med 1997, 337 (11) : 755-761
- MOLLARD R. et al ; Détection de l'hypovigilance chez les conducteurs de trains ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 65-71
- MONK TH ; The arousal model of time of day effects in human performance efficiency. Chronobiologia, 1982, 9, 49, : 49-54
- MONK TH. et al ; Task variables determine which biological clock controls circadian rhythms in human performance ; Nature, 1983, 304 : 543-45
- MONK TH. et al ; Circadien factors during sustained performance : Background and methodology. Behavior Research, Instruments & Computers 1985, 17 (1) : 19-26
- MONK TH. et al ; Diurnal variation in mood and performance in a time-isolated environment. Chronobiol Int 1985, 2 (3) : 185-193
- MONK TH. Et al ; Circadian rhythms in human performance and mood under constant conditions ; Sleep Res 1997, 6 (1) : 9-18
- MONTPLAISIR J. et al ; Performances des hypersomniaques à un test de stimulation de conduite automobile. Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 23-29

- MUZET A. et CLOT J ; Le projet PAVCAS : Poste d'Analyse de la Vigilance en Conduite Automobile Simulée. Une approche pluridisciplinaire de la vigilance au volant ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 259-263
- MUZET A ; Hypovigilance et conduite automobile ; Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière ; Journée spécialisée INRETS, 27 octobre 2000
- NAITOH P ; Minimal sleep to maintain performance : the search for sleep quantum in sustained operations. In : evolution, chronobiology, and functions of polyphasic and ultrashort sleep. Stampi C editor : Why we nap. Boston : Birkhauser ; 1992. pp. 199-216
- NATALE V. et al ; Time of day and mental performances ; Chronobiology International, 1997, 14 (suppl 1) : 123
- NATALE V ; Is there a relationship between morningness and birth date ? Chronobiology International, 1997, 14 (suppl 1)
- NCSDR/NHTSA ; EXPERT PANEL ON DRIVER Fatigue and Sleepiness ; Drowsydriving and automobilecrashes ; 1999 ; (source internet)
- NEUBAUER C. et al ; Ultradian rythms in cognitive performance : no evidence for 1.5-hour rythm ; Biological Psychology 1995, 40 : 281-298
- NOVAK R. et AUVIL-NOVAK S ; Focus group evaluation of night nurse shiftwork difficulties and coping strategie ; Chronobiology International 1996 ; 13 (6) : 457-63
- OMRI L ; Typologie générale des accidents de la circulation survenant hors agglomération de la région de Sousse durant l'année 1992 ; Thèse en Médecine n° 802 Sousse ; 1993
- PACK A. et al ; Characteristics of crashes attributed to the driver having fallen asleep ; Accid Anal Prev 1995 Dec, 27 (6) : 769-75
- PEEKE S. et al ; Combined effects of alcohol and sleep deprivation in normal young adults ; Psychopharmacology 1980 ; 67 : 279-87
- PELTIER M.-A. et DUBISSON B ; Un système adaptatif de diagnostic du comportement du conducteur : Application à la détection d'hypovigilance. Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 239-247
- PETER JH ; Occupational performance of a paced secondary task under conditions of sensory deprivation. I. Heart rate changes in train drivers as a result of monotony. Eur J Appl Physiol 1990, 60, 4 : 309-314
- PETER JH ; Occupational performance of a paced secondary task under conditions of sensory deprivation. II. The influence of professional training. Eur J Appl Physiol 1990, 60, 4 : 315-320
- PETIT C. et TARRIER C ; Effets synergiques du bruit, des vibrations et de la chaleur sur la vigilance du conducteur ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 171-183

- PHILIPP P. et al ; Objective measurement of sleepiness in summer vacation long-distance drivers ; *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1997 ; 102 (5) : 383-89
- PHILLIPS-BERTIN C. et al ; Rôle de l'activité cognitive dans le maintien de la vigilance du conducteur automobile : méthodologie ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 381-387
- PHILLIPS-BERTIN C. et VALLET M ; Le maintien de la vigilance des conducteurs de voiture : des systèmes électroniques vers le génie cognitif ; *Recherche Transport Sécurité n° 42* ; Mars 1994 ; p : 27-34
- PLANQUE S. et al ; Baisses de vigilance et conduite automobile sur piste ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention* ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 327-340
- POTTIER A ; Champs fonctionnels de vision, privation de sommeil et capacités perceptives visuelles des conducteurs ; « Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière » ; Journée spécialisée INRETS, 27 octobre 2000
- POYET C ; L'homme agent de fiabilité dans les systèmes automatisés, Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes, Ed. Octarès 1990, 223-240
- PREVOT E. et LEGER D. Accidents et somnolence diurne : aspects épidémiologiques et réglementaires. Facteurs de dégradation de la vigilance et insécurité routière ; Journée spécialisée INRETS, 27 octobre 2000
- QUILLIAN WC. et al ; The effects of age and alcohol intoxication on simulated driving performance, awareness and self – restraint. *Age Ageing* 1999 Jan ; 28 (1) : 59-66
- RAY et al ; Psychoactive drugs and the risks of injurious motor vehicle crashes in elderly drivers ; *Am J Epidemiol* 1992 ; 136 : 873-83
- REASON ; L'erreur humaine ; Presses Universitaires de France ; 1990
- REGINA E. et al ; Effects of caffeine on alertness in stimulated automobile driving ; *J Appl Psychol* 1974 ; 59 (4) : 483-9
- REDELMEIER D. et TIBSHIRANI R ; Association between cellular telephone calls and motor vehicle collisions ; *N Engl J Med* 1997 ; 336 (7) : 453-8
- RICHARDSON G. et al ; Circadian variation of sleep tendency in elderly and young adult subjects. *Sleep* 1982 ; 5 : S82-S94
- ROEHRS T. et al ; Sleepiness and ethanol effectson simulated driving ; *Alcohol Clin Exp Res* 1994 ; 18 (1) : 154-8
- ROSENTHAL L. et al ; Level of sleepiness and total sleep time following various time in bed conditions ; *Sleep* 1993 ; 16 : 226-32
- ROSENTHAL L. et al ; The sleep-wake activity inventory : a self report measure of day-time sleepiness ; *Biol Psychiatry* 1993 ; 34 : 810-20

- ROUSSEL B ; Substances éveillantes et transports ; Le maintien de la vigilance dans les transports ; Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 41-49
- ROUSSEL B. et al ; La somnolence ; contre-mesures pharmacologiques ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 129-144
- RYAN GA et al ; Age related changes in drivers' crash risk and crash type. *Accid Anal Prev* 1998 May ; 30 (3) : 379-87
- SAAD F. et VILLAME T ; Intégration d'un nouveau système d'assistance dans l'activité des conducteurs d'automobile, In J-G Ganascia (Ed), 1999, Sécurité et cognition, Editions Hermes, Ch. 6, 105-114.
- SAGOT JC ; Ergonomie et conception centrée sur l'homme : exemple de l'étude de la conception du poste de conduite d'un nouveau TGV, *Revue Générale des Chemins de Fer* ; février 2001, 73-83
- SAMEL A. et al ; Jet lag and sleepiness in aircrew ; *J Sleep Res* 1995 ; 4 (2) : 30-6
- SAUVIGNON M ; Approche objective de l'état de vigilance chez l'homme : Relation entre le comportement moteur et incidence sur la mise au point d'un système de sécurité appliqué à la conduite ferroviaire. Thèse d'ETAT en sciences ; Université René Descartes Paris V ; Déc. 1992
- SCHEPENS PJ et al ; Drugs of abuse and alcohol in weekend drivers involved in car crashes in Belgium. *Ann Emerg Med* 1998 May ; 31 (5) : 633-7
- SILHOL D. et TOMEZA J.-M. (1998), Etudes sur la fiabilité humaine dans les métiers de sécurité ferroviaire à la RATP ; *Performances Humaines & Techniques*, mars-avril 1998, 12-17
- SIMPSON H ; Blood alcohol concentration levels and risk of collision ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 71-80
- SIMS RV. et al ; A preliminary assessment of the medical and functional factors associated with vehicle crashes by older adults. *J Am Geriatr Soc* 1998 May ; 46 (5) : 556-61
- SMILEY A. et al ; Assenssment of driving impairment of sleep apnea patients ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 341-347
- SMITH AP. et al ; Effects of breakfast and caffeine on performance and mood in the late morning and after lunch. *Neuropsychobiology* 1992 ; 26 (4) : 198-204
- STAMPI C. et al ; Assessing vigilance levels in transport operations reseach ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 31-37

- STROGATZ SH. et al ; Circadien pacemaker interferes with sleep onset at specific times each day : role in insomnia ; *Am J Physiol* 1987, 253 (1 pt 2) : 172-178
- SUMMALA H ; Automatisations, automation, and modeling of driver's behaviour, *R.T.S.* n° 66, 2000, 35-44.
- TAILLARD J. et MOURET J ; La vigilance et ses variations. Le maintien de la vigilance dans les transports. Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 31-40
- TARDIF LP ; Problèmes d'attention et de vigilance pour les conducteurs de camions ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ;* Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 229-237
- VALLET M ; Les dispositifs de maintien de la vigilance des conducteurs de voitures ; *Le maintien de la vigilance dans les transports ;* Sous la direction de M. Vallet ; Edition Paradigme ; 1991 ; p : 13-21
- VALLET M. et MERCIER-GUYON C ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ;* Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 5-10
- VAN ESLANDE P. et al ; Scénarios-types de production de l'erreur humaine dans l'accident de la route, *Problématique et analyse quantitative ;* Rapport INRETS n° 218 ; Juin 1997
- VAN LAAR M. et al ; Acute and subchronic effects of nefazodone and imipramine on highway driving, cognitive functions, and daytime sleepiness in healthy adult and elderly subjects ; *J Clin Psychopharmacol* 1995 ; 15 (1) : 30-40
- VAUGEOIS P ; Effets de la vigilance sur la performance en conduite automobile ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ;* Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 415-422
- VERNET-MAURY E. et al ; Apports des paramètres neurovégétatifs dans la détection des hypovigilances en simulation de conduite automobile. *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ;* Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p49-62
- VIDACEK S. et al ; Chronobiologic features in a 12-hours working day. *Arh Hig Rada Toksikol* 1994, 45 (4) : 379-387
- VILLEMEUR A ; *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels ;* Collection de la direction des Etudes et de Recherches d'EDF, Paris, Editions Eyrolles, 1998
- VINGILIS E ; Drinking-driving behaviour ; *Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ;* Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 89
- WAN J, KNIPLING R et GOODMAN M ; The role of driver inattention in crashes : new statistics from the 1995 crashworthiness data system ; 48th annual Proceedings of the Association for the Advancement of automotive medicine 1996 Oct 7-9. pp. 377-92

- WANNER L.C ; L'homme dans la sécurité des systèmes pilotés ; La Recherche, 1989, n° 212 (Suppl), 36-49
- WEBB W.B. et FRIEL J ; Sleep stage and personality characteristics of natural long and short sleepers. *Sciences* 1971 ; 171 : 587-8
- WEVER A ; The circadian system of man : Results of Experiments Under Temporal Isolation. Ed Springer-Verlag, New York, 1979 : 198-268
- WEWERS M. et LOW N ; A critical review of visual analogue scales in the measurement of clinical phenomena ; *Res Nurs Health* 1990 ; 13 : 227-36
- WILKINS J. et al ; Sleep-and fatigue- related motor vehicle crashes, with and without alcohol involvement. 11th annual meeting of the Association of Professional Sleep Societies 1997 June
- WILKINSON R ; Interaction of alcohol with incentive and sleep deprivation ; *J Exp Psychol* 1968 ; 76 : 632-9
- WILLIAMS H. et al ; Impaired performance with acute sleep loss ; *Psychol Monogr* 1959 ; 73 : 1-26
- WINGET C. M. et al ; A revieww of human physiological and performance changes associated with desynchronization of biological rythms ; Science and Technology Committee, 1984, 55, 12 : 1085-96
- WYLIE C ; Vigilance of truck drivers : Large data base available soon ; Vigilance et transports, aspects fondamentaux, dégradation et prévention ; Sous la direction de M. VALLET et S. KHARDI ; Presses Universitaires de Lyon 1995, p : 207-211
- WYLIE C. et al ; Commercial motor vehicle driver fatigue and alertness study, technical summary ; Montreal : Transportation Development Center ; 1996
- ZULLEY J. et al ; Falling asleep at the weel : the chief cause of severe traffic accidents ; *Wien Med Wochenschr* 1995, 145 (17-18) : 473
- ZWGHUIZEN-DOORENBOS A. et al ; Effects of caffeine on alertness ; *Psychopharmacology (Berl)* 1990 ; 100 (1) : 36-39

Annexe

Cette annexe présente successivement :

1. Le Rythme Circadien de la vigilance
2. Le rythme des accidents par somnolence au volant
3. La répartition des accidents par hypovigilance selon l'âge
4. L'épidémiologie des accidents par somnolence au volant
5. Les principales causes d'hypovigilance pouvant engendrer des accidents
6. Les moyens de détection et de prévention de la somnolence au volant
7. Les mesures comportementales, professionnelles et éducationnelles pour prévenir la somnolence au volant.

RYTHME CIRCADIEN DE LA VIGILANCE

REFERENCES	RESULTATS
DOGUI M. 1998	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctuations circadiennes réglées physiologiquement (la veille = diurne et le sommeil = nocturne.) - L'organisme restaure au cours du sommeil les dégâts subis durant l'éveil.
BENOIT O. 1976	Les comportements de veille et de sommeil = traduction évidente de structure temporelle circadienne de notre organisme.
GADBOIS C. 1990	<ul style="list-style-type: none"> - Variations circadiennes = expression comportementale de la variation cyclique du niveau d'activation conçue comme une extension du cycle veille/sommeil.
DINGES D. 1995	<p>Le cycle veille / sommeil est réglé par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Facteur homéostatique \leftrightarrow (besoin neurobiologique de sommeil) - Facteur circadien = horloge interne de période de 24 h
AKERSTEDT SAMELA. 1995	<p>Cycle lumière / obscurité \rightarrow Cycle veille / sommeil (Lumière \rightarrow veille ; Obscurité \rightarrow sommeil) \rightarrow somnolence chez les travailleurs de nuit.</p>
BROUGHTON 1989	<ul style="list-style-type: none"> - Périodicité circadienne marquée avec un maximum de besoin de sommeil au milieu de la nuit. \rightarrow Diminution majeure de la performance la nuit \rightarrow Augmentation du nombre d'accidents la nuit
GADBOIS C. 1990	<p>Rythmicité circadienne du niveau des capacités de l'opérateur humain :</p> <ul style="list-style-type: none"> - montée au cours de la matinée - maximum l'après-midi - déclin la soirée \rightarrow Erreurs 2 fois plus nombreux à 3 h du matin qu'entre 8 et 10 h (tâche de surveillance)
SAUVIGNON M. 1992	<ul style="list-style-type: none"> - Efficience plus élevée dans la deuxième moitié de la journée. - Performance se dégrade la nuit plus rapidement que dans la journée.

RYTHME DES ACCIDENTS PAR SOMNOLENCE AU VOLANT

REFERENCES	RESULTATS
FOLKARD 1997	Rythme circadien de 24 h du risque des accidents de la route avec un pic vers 3 heures de matin
LENNE et al. 1997	Des performances de conduite altérées en début d'après-midi et tard la nuit.
SAUVIGNON 1992	Baisse de la vigilance 2 fois par jour : 15h – 17h et 2h – 5h du matin Période à risque élevé d'accidents : 14 h à 18 h et 1 h à 8 h
ROUSSEL 1995	Somnolence au volant prédomine de 13 h à 15 h et de 1 h à 5 h
PLANQUE 1995	Majorité des accidents aux USA et en France : 13h – 16h et 1h – 6h du matin sur la période de 1988-1992
CORFITSEN 1996	Fatigue importante entre minuit et 6 h du matin chez les conducteurs de nuit
ZULLEY et al. 1995	– 204 accidents fatals dus à l'endormissement au volant, – Pics aux environs de 6 h du matin et 2 h de l'après-midi
PACK et al. 1995	– 4 333 accidents de la route dus à l'endormissement du conducteur, – Pics minuit à 7 h du matin et en milieu d'après-midi
LIU 1998	Parmi 100 accidents mortels de la route sur 1991-1996, plus des 2/3 se passent entre 22 h et 6 h du matin
KESSLER 1992	Le maximum de risque d'accidents se voit chez les travailleurs de minuit à 8 h du matin (travail posté)
LEVINE et al. 1995	prédominance des accidents de la route l'après-midi et les jours de week-end
DOGUI 1998 AMARA1994 HAMMOUDA1994 FERCHICHI 1998 OMRI 1993	Accident de la voie publique dans la région de Sousse-TUNISIE : – pic d'accidents : 16 h – 20 h – creux d'accidents : 1 h – 6 h

REPARTITION DES ACCIDENTS PAR HYPOVIGILANCE SELON L'ÂGE

REFERENCES	RESULTATS
RYAN 1998	100 accidents mortels de la route sur 1991-1996 se produisent : – pendant la journée pour 90 % des vieux (>80 ans) durant la nuit pour 64 % des jeunes (<20 ans)
WILKINS 1997 PACK 1995 KNIPLING 1996	Aux USA : – <45 ans : accidents plus fréquents la nuit ; rares l'après-midi – 46 à 65 ans : fréquents l'après-midi ; moins nombreux la nuit (pic à 7 h) – >65 ans : fréquents l'après-midi (pics à 14 h)
RYAN 1998	– <30 ans : se font sur voiture unique suite à un virage – 30 à 59 ans : sur la même direction suite à un arrêt non proportionné pendant l'accident – >60 ans : sur angle droit suite à un mouvement tournant
PACK 1995 MAYCOK 1996 KNIPLING-WAN 1994	16-29 ans courent 4 fois plus de risque que ceux de plus de 30 ans.
KNIPLING-WAN 1995	Age <30 ans sont à l'origine de 2/3 des accidents
RYAN 1998	Accidents de la route entre 1989-1992 – 35 % des accidents sont attribués aux jeunes <25 ans – 3 % des accidents sont attribués aux vieux >70 ans
LIU 1998	Parmi 109 décès secondaires à 100 accidents de la route entre 1991-1996, 76 sont des jeunes (15-19 ans) dont 2/3 sont des garçons. Les jeunes conducteurs constituent deux groupes de risques : – inexpérimentées ivres qui conduisent sur route unique – roulent tard la nuit après une ingestion d'alcool

EPIDEMIOLOGIE DES ACCIDENTS PAR SOMNOLENCE AU VOLANT 1/2)

REFERENCES	RÉSULTATS
BERRICHI et al. 1991	91 % des accidents d'automobiles sont attribués aux facteurs humains (hypovigilance, fatigue, endormissement)
PLANQUE et al. 1995	La fatigue, l'inattention et l'assoupissement sont les causes principales des accidents mortels en France et aux USA entre 1988 et 1992
PACK et al. 1995	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents par hypovigilance aussi nombreux et graves que ceux dus à l'alcool ou à l'excès de vitesse. - 4 333 accidents de la route dus à l'endormissement du conducteur (1990-1992)
LYZNICKI 1998	Somnolence au volant est le facteur causal de 1 à 3 % de tous les accidents de véhicules aux USA
PLANQUE et al. 1995	<ul style="list-style-type: none"> - Fatigue, inattention et assoupissement sont les causes dans 29 % des accidents mortels en France de 1988 à 1992 - 13 % des cas aux USA sont imputés à l'endormissement du conducteur
BOUSSUGE et LAFONT 1995	Fatigue, inattention et assoupissement au volant sont les causes dans 28 % des accidents mortels sur les autoroutes de liaison (Bilan sur 15 ans : 1979-1994 par l'ASSECAR et l'ASFA)
MONTPLAISIR et al. 1995	La perte de vigilance est la 1 ^{ère} cause d'accidents mortels : 34 % en France et 19 % en Australie
NHTSA 1999	Somnolence du conducteur → 56 000 accidents annuels aux USA → 1 550 décès annuels aux USA

EPIDEMIOLOGIE DES ACCIDENTS PAR SOMNOLENCE AU VOLANT 2/2)

REFERENCES	RÉSULTATS
LAFONT R. 1991 PHILIPPS- BERTIN et VALLET 1994	Baisse de vigilance → 25 – 34 % des accidents mortels sur autoroute en France → 19 % en Australie
VAN ESLANDE et al. 1997	Baisse de vigilance ou d'attention dans 29 scénarios types d'accidents parmi les 61 élaborés (Rapport INRETS)
ZULEY et al. que 1995	L'analyse de 204 accidents survenus en Bavière en 1991 révèle l'endormissement au volant était la cause la plus fréquente
PHILIPPS- BERTIN et VALLET 1994	Baisse de vigilance pendant la conduite chez 300 conducteurs
TARDIF 1995	<ul style="list-style-type: none"> – Le camionnage est impliqué dans 5 % de tous les accidents de la route et dans 20 % des accidents mortels – L'inattention est la cause de 20 % des accidents – La défaillance du conducteur est la cause de 50 % des accidents
MACKIER et WYLIE, 1991	Le taux des accidents attribués à l'inattention des conducteurs de camions est estimé à 31 %, 41%, 54% selon les études
MUZET et CLOT 1995	La fatigue est la cause de 41 % des accidents de poids lourds aux USA

**PRINCIPALES CAUSES D'HYPOVIGILANCE DU CONDUCTEUR
POUVANT ENGENDRER DES ACCIDENTS (1/2)**

REFERENCES	RESULTATS
POTTIER 2000	La privation du sommeil représente un facteur accidentogène en conduite automobile lors des longs trajets
LEENE et al. 1998	Une privation de sommeil de 24h détériore la performance de conduite surtout la nuit (augmentation vitesse et nombre de déviations latérales)
MITLER 1997	Déficit de sommeil chez les conducteurs de poids lourds incompatible avec le niveau de vigilance nécessaire
PREVOT et LEGER 2000	Les maladies de sommeil (narcolepsie, syndrome d'apnée de sommeil) sont en causes dans 28% des accidents de la voie publique et touche 20 % de la population générale en France
ALDRICH 1989 SAS	Les conducteurs présentant une maladie du sommeil sont plus exposés aux accidents par hypovigilance. Le risque couru par les narcoleptiques est plus important que celui par les souffrants de SAS
LEGER et al. au 1995 SMILEY 1995	Le syndrome d'apnée de sommeil est un risque d'endormissement volant et d'accidents 5 fois plus élevé que dans la population générale
VINGILIS 1995 SIMPSON 1995	Il existe une augmentation significative du risque de collision avec le taux d'alcoolémie, surtout chez les jeunes conducteurs
Mc CARTT 1996	La consommation d'alcool est à l'origine de 20 % des accidents sur voiture seule
CHABROL 2000	L'alcool est en cause dans 30% des accidents mortels en France entraînant la responsabilité du conducteur, et 45% avec un seul véhicule.
ROEHRS 1994	Après ingestion d'alcool à quantité égale, le nombre de déviations de la route est : – 4 fois plus important après 8 h de sommeil – 15 fois plus important après 4 h de sommeil
QUILLIAN 1999	Pas de différence entre les sujets âgés (>60 ans) et les jeunes adultes (30-50 ans) en terme de sensibilité à l'effet de l'alcool et de performance de conduite.
LIU 1998 SCHEPENS 1998	1/5 des 100 accidents mortels sur 1991-1996 sont attribués à l'alcool ou aux médicaments. Tester l'alcoolémie seule chez les conducteurs est insuffisant

**PRINCIPALES CAUSES D'HYPOVIGILANCE DU CONDUCTEUR POUVANT
ENGENDRER DES ACCIDENTS (2/2)**

REFERENCES	RESULTATS
KOZENA 1995 VAN LAAR 1995 RAY 1992, LEVEILLE 1994 CEUTEL 1995, GENGO-MANNING 1990	La prise de médicaments psychotropes (anxiolytiques, sédatifs antihistaminiques, benzodiazépiniques, antidépresseurs) augmente le risque d'accidents secondaires à la somnolence au volant
DE DEGIER 1995	Les psychotropes sont à l'origine de 10 % des victimes des accidents de la route en Europe (5000 décès et 150.000 blessés chaque année)
ETARD et al. 1995 BILLARD 2000	Le Zolpidem est un hypnotique qui provoque 12 heures après son absorption une altération significative des variables vitesse et position latérale sur simulateur de conduite
NHTSA 1999	<ul style="list-style-type: none"> - Le travail de nuit (posté) ou supplémentaire est à l'origine de la moitié des accidents attribués à la somnolence au volant - 50 % des conducteurs accidentés rapportent avoir eu un travail posté avant l'incident
NOVAK 1996	95 % des infirmières de nuit et 25 % des internes sont victimes d'accidents ou presque accidents pendant leur retour à la maison.
LUNDBERG 1998	L'altération cognitive est à l'origine de 65 % des accidents de la route chez les vieux conducteurs (âge)
SIMS 1998	<ul style="list-style-type: none"> - Parmi 174 vieux conducteurs (55-90 ans), 19 ont prouvé entre 1 et 7 fautes d'accidents sur 1985-1991 - La réduction du champ visuel en était la cause dans 40 % des cas
PETIT, TARRIERE 1991	L'association vibration-bruit-chaleur va dans le sens d'une dégradation de la vigilance
REDELMËIER et TIBSHIRANI 1997	Parler au téléphone en conduisant engendre un haut risque d'accidents automobiles
MITLER 1988	Le sommeil survient dans les tâches répétitives (conduite sur longue distance)

**MESURES DE DETECTION ET DE PREVENTION
DE LA SOMNOLENCE AU VOLANT (1/3)**

REFERENCES	METHODES, TECHNIQUES ET OUTILS
<p>MUZET et CLOT 1995</p>	<p>Projet « AVCAS »</p> <ul style="list-style-type: none"> – Poste d'Analyse de la Vigilance en Conduite Automobile Simulée – Il tient compte des facteurs individuels (âge, motivation, expérience) et situationnels (heure, fatigue, sommeil, médicaments) (évaluation du comportement du conducteur dans différentes situations de conduite. – L'application de ce poste est la mise en œuvre d'un dispositif permettant d'avertir le pilote en situation de conduite dégradée et à proposer éventuellement l'arrêt automatique du véhicule
<p>BROOKHUIS 1995</p> <p>CHAN et HERRERA 1995</p>	<p>Projet « DETER »</p> <ul style="list-style-type: none"> – détection, renforcement et formation pour réduire l'erreur. – développement des prototypes intégrés de contrôle de la dégradation des performances du conducteur. – Evaluation et contrôle de la dégradation des performances du conducteur sur simulateur et en situation réelle de conduite <ul style="list-style-type: none"> . collecte instantanée des données de conduite . interprétation et analyse de données . stockage de références de comportement de conduite normale – Installation de capteurs de mesures des caractéristiques d'une bonne ou d'un dysfonctionnement de conduite – Déclenchement automatique d'une alarme lors d'un franchissement de ces deux états – Diagnostic basé sur le nombre d'erreurs commises, les retards réactionnels et les variations des modes opératoires utilisés
<p>KHARDI et HERNANDEZ- GRESS 2000</p>	<p>projet européen SAVE (System for effective assesement of the driver state and vehicle control in emergency situation). C'est un nouveau système hybride de diagnostic, en temps réel, de l'état de vigilance du conducteur en conduite réelle.</p> <ul style="list-style-type: none"> –> détecter une dégradation de l'état du conducteur, en établir la cause, en évaluer la sévérité, alerter le conducteur et déclencher, si besoin, l'arrêt automatique du véhicule sur le bord de la chaussée. –> des niveaux accidentogènes (vigilance dégradée) et hypovigilants dans des proportions moyennes respectivement de 31 % et 69 % des baisses de vigilance des conducteurs. La durée moyenne totale de l'hypovigilance est égale à 10,2 minutes (8,5 % de la durée de conduite).

MESURES DE DETECTION ET DE PREVENTION DE LA SOMNOLENCE AU VOLANT (2/3)

REFERENCES	METHODES, TECHNIQUES ET OUTILS
MALATERRE et FONTAINE 1991	<p>Approche d'évaluation des aides au maintien des la vigilance basée sur deux principes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - identification des besoins du conducteur et amélioration de son état (fatigue, inattention, alcool) ; - maintenir un état de vigilance compatible avec les exigences de la conduite à l'aide d'un système de déclenchement d'alarme lors du franchissement de marquage axiale <p>→ Quatre classes de dispositifs d'aide au maintien de la vigilance :</p> <ul style="list-style-type: none"> - détection de l'hypovigilance - détection d'une dégradation des performances - déclenchement d'une alarme - arrêt automatique du véhicule
LABIALE 1991	Maintien et amélioration du niveau de vigilance des conducteurs à l'aide d'un signal d'alerte visuel placé sur la planche de bord (alerte ni trop fréquente ni trop rare)
GARDER - ALEXANDER 1995	<p>Dispositifs d'alerte de type « ande sonore »</p> <p>Marquages en relief posés sur la chaussée et sonores au passage des roues alertent le conducteur somnolent avant de quitter la route</p>
HAWORTH et VULCAN 1991	<p>Moniteurs de fatigue :</p> <ul style="list-style-type: none"> - moniteur de fermeture des yeux qui émet une alarme audible lorsqu'elle dépasse 0,5 seconde - dispositif de mesure du temps de réaction à un signal visuel d'alarme de fatigue - moniteur de signal de la tête qui bourdonne lorsque la tête dépasse un angle prédéterminé <p>Selon HAWORTH, ces moniteurs disponibles dans le commerce, n'ont pas d'effets sur le maintien de la vigilance ni sur la prévention d'une altération de la performance</p>
KHARDI et al. 1995	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse quantitative de l'EEG pour évaluer les périodes d'hypovigilance des conducteurs de véhicules légers (à partir de données expérimentales) <ul style="list-style-type: none"> . traitement des mouvements du volant . traitement de la vitesse du véhicule <p>→ décélération spontanée du véhicule.</p> <p>→ relaxation physiologique des conducteurs ayant effectué un trajet autoroutier de 6h relaxation physiologique</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une faible relaxation physiologique n'est pas suffisante, à elle seule, pour être le signe précurseur d'une baisse de vigilance.

**MESURES DE DETECTION ET DE PREVENTION
DE LA SOMNOLENCE AU VOLANT (3/3)**

REFERENCES	METHODES, TECHNIQUES ET OUTILS
<p>PELTIER et DUBUISSON 1995</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Système de diagnostic et d'apprentissage permettant d'analyser le comportement du conducteur, de détecter l'évolution de son activité de conduite en conditions réelles ainsi que son hypovigilance (EEG). - Cette approche d'apprentissage progressif des caractéristiques du conducteur est adaptative car elle tient compte de la spécificité du conducteur (variabilité intra-individuelle des manifestations de l'hypovigilance) et des conditions de conduite rencontrées. → un état d'hypovigilance peut avoir des manifestations différentes sur l'activité de conduite. → hypovigilance physiologique et altérations de performances de conduite ne sont pas nécessairement simultanées
<p>PLANQUE 1995</p>	<p>Système de détection des baisses de vigilance basé sur l'analyse simultanée des signaux physiologiques et comportementaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - EEG : quantité de bouffées d'ondes alpha et apparition de thêta, - EOG : mouvements oculaires lents, - Film vidéo du visage du conducteur : temps de fermeture des yeux, - Données cinématiques : angles du volant, vitesse et trajectoire du véhicule. → Etablissement d'une corrélation entre les résultats EEG et l'analyse comportementale → Elaboration d'une référence physiologique du niveau de vigilance en situation réelle de conduite → les fonctions « volant » sont capables de discriminer deux niveaux d'éveil différents (CHAPUT D. 1991)
<p>FAKHAR et al. 1991</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Correspondance entre les signaux physiologiques (EEG, EOG) et la posture corporelle (indicateur de fatigue). → :une inclinaison de la tête vers l'arrière indique une vigilance basse.
<p>MACKIER et WYLIE 1991</p>	<p>Deux classes de détection de la perte de vigilance des conducteurs de camions :</p> <ul style="list-style-type: none"> - maintien de la vigilance de façon volontaire (contrôlée par le conducteur) - maintien de la vigilance de façon involontaire (contrôlée par l'extérieur) (déclenchement des alarmes)

**MESURES DE PREVENTION DE LA SOMNOLENCE AU VOLANT
(COMPORTEMENTALES, PROFESSIONNELLES, EDUCATIONNELLES) (1/2)**

REFERENCES	METHODES, TECHNIQUES ET OUTILS
DINGES 1987, 1992 et 1995	Sieste de courte durée : 15-20 mn avant les longs trajets augmentent la performance même en situation de privation de sommeil
ROUSSEL 1991 GILLBERG 1996	Sieste 20-40 mn à 2-3 h, judicieusement placées, préviennent les perturbations des capacités psychophysiologiques secondaires à l'éveil prolongé.
FEYER 1997 MERRIL 1997	Un repos durant la nuit avec une alternance de deux conducteurs est une bonne stratégie pour surmonter la fatigue des conducteurs de camion durant les longs trajets
NHTSA 1999	Prévenir la somnolence par un sommeil adéquat avant la conduite est plus facile et efficace
GRIFITTHIS 1990	Boire deux cafés à un effet positif durant une heure et augmente la performance sur simulateur de conduite
SMITH 1992	La caféine à dose de 300mg/j améliore la performance pour des tâches d'attention, de raisonnement et de mémoire
ROUSSEL 1995	Le Modafinil est une substance éveillante sans effet sur le comportement (comparativement à la caféine et aux amphétamines).
HARMA 1993	Gestion des horaires de travail (ajuster le travail au changement du rythme circadien)
NHTSA 1999	Un cycle travail-repos conforme au rythme circadien améliore le sommeil et la performance
CASTON 1993	<ul style="list-style-type: none"> - Une rotation de travail tous les 1 – 2 jours n'entraîne pas de troubles des rythmes circadiens - Des périodes de repos plus longues et moins fréquentes donnent une meilleure adaptation au travail posté
VIDACEK 1994 BROWN 1994	Ne pas travailler plus de 8 h/j car travailler 12 heures augmente les risques d'accidents
DINGES 1992 NAITOH 1992	Faciliter les siestes pour les travailleurs de nuit

**MESURES DE PREVENTION DE LA SOMNOLENCE AU VOLANT
(COMPORTEMENTALES, PROFESSIONNELLES, EDUCATIONNELLES) (2/2)**

REFERENCES	METHODES, TECHNIQUES ET OUTILS
LYZNICKI 1998	Mettre en place un programme d'éducation (médecins, publics et conducteurs) relatifs aux risques de somnolence au volant
NHTSA 1999 : National Highway Traffic Safety Administration	<ul style="list-style-type: none"> - Eduquer les jeunes conducteurs : <ul style="list-style-type: none"> . comment réduire le risque lié au style de vie (alcool, conduite tard dans la nuit... . démarche à suivre en cas de somnolence au volant (arrêt, sieste, café...) - Eduquer les travailleurs postés : <ul style="list-style-type: none"> . respecter le cycle veille/sommeil . éviter la conduite tard dans la nuit immédiatement après le travail de nuit - Promouvoir les « bandes sonores » en tant que contre-mesure efficace - Elever la conscience du risque chez le public
MITLER 1988 BROWN 1994	<ul style="list-style-type: none"> - Eviter la consommation d'alcool - Eviter la conduite de 00 h à 6 h où la somnolence est habituelle
GRAU et al. 2000	Une activité sportive modérée améliore le rythme veille-sommeil et la vigilance diurne au cours d'une tâche de conduite sur simulateur
PHILIPS- BERTIN 1995	Effectuer une activité cognitive de type exercices mentaux pour maintenir et/ou réactiver la vigilance du conducteur au cours d'une tâche monotone.
TIBERGE (in CHABROL 2000)	<p>Quoiqu'on fasse – augmenter le volume de la radio, allumer une cigarette, ouvrir la fenêtre – le sommeil l'emportera dans tous les cas.</p> <p>Le seul conseil qu'on puisse donner, c'est de s'arrêter dès que l'on s'aperçoit l'un des signes de baisse de la vigilance pour éviter l'accident.</p>

L'analyse des rythmes de la vigilance chez l'homme montre que des épisodes d'hypovigilance apparaissent à des horaires prévisibles de la journée. La baisse de la vigilance de l'opérateur humain est parmi les principales causes d'accidents. L'aspect chronobiologique de la vigilance n'a jamais été abordé dans le domaine de la sécurité des transports ferroviaires et pourtant, le régime de rotation des horaires du travail des opérateurs humains, dans ce domaine, pose le même problème que le travail posté. La prise en compte des données chronobiologiques peut améliorer la sécurité en proposant des solutions d'adaptation des horaires du travail aux variations circadiennes des capacités fonctionnelles de l'opérateur humain. Cet ouvrage développe une approche méthodologique d'application des concepts liés à la chronobiologie de la vigilance en vue d'améliorer la sécurité des systèmes de transports ferroviaires guidés.

Habib HADJ-MABROUK, chargé de recherche à l'Unité de Recherche ESTAS - Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés et de leur Sécurité

Abderraouf HADJ-MABROUK, Docteur en Médecine, Stagiaire à l'INRETS

Mohamed DOGUI, Docteur en Médecine et Professeur en physiologie, Chef du service d'explorations fonctionnelles du système nerveux (CHU Sousse-Tunisie)

Synthèse INRETS n°38

Juillet 2001

Prix : 100 F.
15,24 €