



Thème 3 : IRCAD

Enjeu d'une alerte « chaussée mouillée » en terme d'accidents en Côtes d'Armor

WBS 4.2

| | |
|-----------|---|
| Référence | IRCAD : Enjeu d'une alerte « chaussée mouillée » en termes d'accidents en Côtes d'Armor |
| Date | : 12/02/2009 |
| Version | : V1 |

| | |
|-----------|--|
| Auteur(s) | Maurice Aron, Ruth Bergel, David Doucet, Gérard Louah, Peggy Subirats, Eric Violette |
| Thème | : 3 (IRCAD) – 2 ^{ème} tranche |

| | |
|-------------|---|
| Financement | : DRAST - Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique |
|-------------|---|

Responsables : Maurice ARON, Ruth Bergel

Table des Matières

| | |
|---|----|
| Table des Matières | 3 |
| Table des Tableaux..... | 4 |
| L’alerte des conducteurs en cas de chaussée mouillée : l’enjeu en terme d’accidents dans les Côtes d’Armor..... | 5 |
| 1. L’enjeu : les pré-supposés, les différentes estimations possibles | 5 |
| 2. Les accidents corporels en Côte d’Armor en virage, sur chaussée mouillée, hors agglomération de plus de 5000 habitants | 5 |
| 3. L’exposition à la chaussée mouillée..... | 6 |
| 4. Décompte des accidents où l’information IRCAD n’aurait sans doute pas suffi à éviter l’accident ... | 8 |
| 5. Nombre d’accidents par virage pour les virages où au moins un accident corporel est survenu | 9 |
| 5.1 Nombre d’accidents par virage en Haute Normandie | 9 |
| 5.1.1 Modélisation probabiliste | 9 |
| 5.1.2 Les virages où sont survenus plusieurs accidents, en Haute-Normandie | 10 |
| 5.2 Extrapolation du calcul pour les Côtes d’Armor, sur 10 ans..... | 11 |
| 6. Approche par véhicule-kilomètre..... | 11 |
| 7. Approche conducteur | 12 |
| 8. Perspectives pour la généralisation d’un tel système | 12 |
| 9. Conclusion..... | 13 |
| 10. Références | 13 |
| Annexe: Comparaison entre la pluviométrie durant l’expérimentation IRCAD-SARI en 2008 et la pluviométrie 1996-2005 dans les Côtes d’Armor | 14 |
| A1. Analyse à Binic | 14 |
| A1.1 L’anomalie « pluie et chaussée sèche »..... | 15 |
| A1.2 Pluie (pluviomètre) durant l’expérimentation et pluie (pluviomètre) durant l’année 2008.... | 15 |
| A1.3 Comparaison entre les indications du pluviomètre en 2008 et celles des années 1997-2005..... | 16 |
| A2. Analyse à Lannion | 16 |
| A2.1 L’anomalie « pluie et chaussée sèche »..... | 17 |
| A2.2 Pluie (pluviomètre) durant l’expérimentation et pluie (pluviomètre) durant l’année 2008.... | 17 |
| A3. Comparaison entre les deux sites | 18 |

Table des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Les observations à BINIC (référence sans PMV et avec l'alerte générale)..... | 6 |
| Tableau 2. Les observations à St Michel en Grève (référence sans PMV et avec l'alerte générale) | 7 |
| Tableau 3. Accidents et virages selon le nombre d'accidents en virage en Haute-Normandie..... | 9 |
| Tableau 4. Les distributions théoriques et observées des virages et du nombre d'accidents selon le nombre d'accident par virage en Haute-Normandie..... | 10 |
| Tableau 5. Les virages avec 3 accidents ou plus (distributions théorique et observée) en Haute-Normandie | 10 |
| Tableau 6. Convergence entre le pluviomètre et le capteur de hauteur d'eau à Binic en durée..... | 14 |
| Tableau 7. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau à Binic | 15 |
| Tableau 8. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau >0,02 mm à Binic | 15 |
| Tableau 9. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau >0,05 mm à Binic | 15 |
| Tableau 10. Convergence entre le pluviomètre et le capteur de hauteur d'eau à Lannion en durée | 16 |
| Tableau 11. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau à Lannion..... | 16 |
| Tableau 12. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau > 0,02 mm à Lannion..... | 17 |
| Tableau 13. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau > 0,05 mm à Lannion..... | 17 |

L'alerte des conducteurs en cas de chaussée mouillée : l'enjeu en terme d'accidents dans les Côtes d'Armor

1. L'enjeu : les pré-supposés, les différentes estimations possibles

A la différence des travaux d'évaluation menés par ailleurs dans le projet SARI (notamment les contributions du CETE de Normandie –Centre et d'AJISE), nous estimons ici le nombre maximum d'accidents qui seraient évités si l'alerte IRCAD-SARI était parfaite, c'est à dire si :

- L'algorithme fournissant les conseils de réduction de vitesse était parfaitement fondé et calibré en fonction de l'état de la chaussée et des caractéristiques du virage,
- les données de vitesse des véhicules et de hauteur d'eau sur la chaussée recueillies étaient très précises,
- le dispositif d'affichage était parfaitement lisible et compréhensible
- et avec des moyens de recueil, de traitement et de diffusion de l'information 100% opérationnels,
- tout ceci s'adressant à des conducteurs obéissants.

Après avoir présenté les accidents en virage sur chaussée mouillée dans les Côtes d'Armor (section 2), nous présentons l'exposition au risque sur chaussée mouillée (section 3, complétée par une annexe). En section 4 nous analysons les causes des accidents pour décompter ceux qui n'auraient probablement pas été évités même en présence d'une alerte parfaite. En section 5 nous analysons et modélisons le nombre d'accidents par virage (approche locale) pour d'une part tenter d'en déduire le nombre de virages non accidentés, et pour d'autre part montrer l'existence d'un nombre (réduit) de virages particulièrement accidentés, susceptibles d'être équipés en priorité. En section 6 nous développons une approche par véhicule –kilomètre (et non par virage). En section 7 nous donnons quelques éléments sur une approche « conducteur » pour dénombrier le nombre de conducteurs susceptibles de voir le PMV allumé. En cas de vitesse élevée, ceux-ci peuvent comprendre que leur pratique de vitesse est erronée et par la suite modifier leur conduite en virage sur chaussée mouillée. La section 8 esquisse les possibilités de généralisation du système d'IRCAD-SARI et notamment une coopération avec Météo-France pour alléger les coûts en équipement météorologique. La conclusion résume les résultats obtenus quant à l'enjeu.

2. Les accidents corporels en Côte d'Armor en virage, sur chaussée mouillée, hors agglomération de plus de 5000 habitants

Entre 1996 et 2005 sont survenus dans les Côtes d'Armor, 5296 accidents corporels dont 3855 (73%) hors agglomération de plus de 5000 habitants –cf [2]-.

Sur ces 5296 accidents, 1400 (27%) ont eu lieu en virage. En se restreignant aux 3855 accidents (soit 73% des 5296 accidents) survenus hors agglomération de plus de 5000 habitants, 1163 sont survenus en virage, soit 30%.

Une chaussée mouillée est signalée pour *25% des accidents corporels (1277 accidents sur 5296 accidents)*. En se limitant aux 1163 accidents en virage et hors agglomération de plus de 5000 h, **370 accidents (31,8% de ces 1163 accidents en virage, ou encore 7% de l'ensemble des accidents corporels) sont survenus sur une chaussée mouillée.**

3. L'exposition à la chaussée mouillée

La durée de la pluie dans les Côtes d'Armor est de l'ordre de 8% du temps (8,7% du temps en comptant la bruine) ; il y a un « sur-risque » pluie, parce que le pourcentage d'accidents par temps de pluie (15,7%) est supérieur ce pourcentage d'exposition à la pluie.

La légère baisse du trafic constatée hors agglomération par temps de pluie renforce le niveau du sur-risque pluie. En Haute-Normandie où le CETE NC a constitué une importante base de données trafic, cette baisse est de l'ordre de 1% à 2% . Le nombre d'accidents de deux roues par temps de pluie ne représente que 8,8% des accidents où un deux-roues est impliqué, à peine plus que la durée de pluie, mais l'apparente faiblesse du sur-risque pluie pour les deux roues masque une mauvaise connaissance du trafic des deux roues, qui, eux, doivent circuler beaucoup moins par temps de pluie.

Pour essayer d'établir s'il y a aussi un « sur-risque » significativement supérieur à 1 lorsqu'un véhicule circule sur chaussée mouillée, il faut établir la part des conducteurs circulant sur chaussée mouillée .

La période durant laquelle la chaussée reste mouillée dans les Côtes d'Armor est estimée ici par les deux capteurs (Vaisala) installés par IRCAD SARI à St Quay-Portrieux près de Binic et à Saint Michel en Grève près de Lannion.

D'après les capteurs Vaisala considérés comme de haute précision installés par IRCAD-SARI dans les Côtes d'Armor, la hauteur d'eau sur la chaussée dépasse 0,05 mm pendant 14,23% du temps à St Quay-Portrieux (statistique portant sur l'équivalent de 117 jours) et pendant 19,38% du temps à Saint Michel en Grève. (statistique portant sur l'équivalent de 99 jours). Ces statistiques devront être revues en intégrant les données de Juillet 2008 à Janvier 2009.

Le tableau suivant fournit les nombres de véhicules et minutes pour lesquels le trafic est disponible concomitamment avec les données VAISALA.

| Binic | Capteur 1 | Capteur 2 | Capteur 3 | Capteur 4 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nombre de Minutes | 10941 | 12057 | 12043 | 57072 |
| Nb Jours complets (*) | 7,6 | 8,4 | 8,4 | 39,7 |
| % Durée mouillée (> 0,05 mm) | 26,0% | 26,5% | 26,5% | 13,5% |
| Nb Véhicules | 46925 | 49736 | 49767 | 253911 |
| % véhicules en mouillé | 26,2% | 26,8% | 26,8% | 13,4% |
| Trafic journalier | 6174 | 5921 | 5925 | 6396 |

Tableau 1. Les observations à BINIC (référence sans PMV et avec l'alerte générale)

(*) Par division de la ligne précédente par $1440=60*24$, le nombre de minutes par jour

Aux capteurs 1, 2, 3, trafic et hauteur d'eau sont à la fois disponibles pour l'équivalent de 8 jours complets de mesures – on a l'équivalent de 40 jours de données au capteur 4.

Il ne semble pas y avoir, à Binic, de baisse de mobilité lorsque la chaussée est mouillée.

| St Michel en Grève | Capteur 1 | Capteur 2 | Capteur 3 | Capteur 4 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nb Minutes | 79347 | 56929 | 72670 | 62347 |
| Nb Jours complets | 55,1 | 39,5 | 50,5 | 43,3 |
| % durée mouillée | 17,97% | 19,57% | 19,46% | 21,22% |
| Nb Véhicules | 261292 | 184996 | 234661 | 196381 |
| % véhicules en mouillé | 16.1% | 17.6% | 17.4% | 19.3% |
| Trafic journalier | 4742 | 4679 | 4650 | 4536 |

Tableau 2. Les observations à St Michel en Grève (référence sans PMV et avec l'alerte générale)

Contrairement à Binic, on voit une mobilité un peu réduite par chaussée mouillée : les pourcentages de véhicules circulant sur chaussée mouillée sont inférieurs de 2% environ au pourcentage de temps où la chaussée est mouillée. Selon les capteurs, le pourcentage du temps où la chaussée est mouillée varie de 18% à 21%, alors que le pourcentage des véhicules circulant sur chaussée mouillée varie de 16% à 18%. On considérera que 17% des conducteurs circulent sur chaussée mouillée.

Le coefficient à appliquer au trafic total annuel (de l'ordre de 2 millions de véhicules pour un site dont le trafic journalier est dans un sens de l'ordre de 5500) pour avoir le nombre de véhicules circulant sur chaussée mouillée sera pris à 17%, sur la base de ce tableau 2, a priori plus fiable que le tableau 1 puisqu'il y a une plus grande homogénéité de la hauteur d'eau.

Il faut cependant vérifier que la durée de chaussée humide durant l'expérimentation est voisine de celle ayant prévalu entre 1996 et 2005 (les années où les accidents ont été comptabilisés ; comme on ne connaît pas les périodes de chaussée humide entre 1996 et 2005, on remplace cette comparaison par la comparaison entre la pluviométrie durant l'expérimentation à celle ayant prévalu entre 1996 et 2005; ceci est fait dans l'annexe, mais ne conduit pas à changer le niveau de 17% d'exposition au risque de chaussée mouillée.

On notera que d'après les mesures du LRPC de Lyon (cf. Gothié *et al.*[4]), une hauteur d'eau de 0,05 mm en terrain plat (où sont installés les capteurs VAISALA) correspond à une hauteur d'eau 0,02 = 0,05/2,5 mm à St Michel en Grève dans le virage proprement dit, car le dévers du virage provoque une évacuation d'eau, et à une hauteur d'eau 0,019 = 0,05/2,62 mm dans le virage à St Quay-Portrieux.

Lorsque l'on se restreint aux 1163 accidents survenus en dix ans en virage, hors agglomération, la comparaison entre le pourcentage d'accidents par chaussée mouillée (31%, cf. plus haut) et le pourcentage de véhicules circulant sur chaussée mouillée (pris à 17% en moyenne) montre un important sur-risque

$$\text{d'accidents en chaussée mouillée, égal à : } \frac{\frac{31\%}{100\% - 31\%}}{17\%} = 2,2$$

Nota : Il faut toutefois bien dire que si le pourcentage d'accidents par chaussée mouillée est bien connu (par les bulletins d'analyse des accidents), l'autre terme de la comparaison, le pourcentage de véhicules circulant sur chaussée mouillée dépend fortement du seuil de hauteur d'eau choisi à partir duquel la chaussée est considérée comme humide. Avec un seuil moins élevé (par exemple 0,02 mm en terrain plat), il y a davantage de temps où la chaussée est mouillée (23,4% au lieu de 19,4% à Saint Michel en Grève) et davantage de véhicules circulant dans ces périodes (21,4% au lieu de 17%). A Binic-St Quay-Portrieux, durant l'expérimentation, avec un seuil de hauteur d'eau de 0,02 mm, au 4^{ème} capteur au centre du virage, 18% des véhicules circulent par chaussée mouillée au lieu de 13,4% avec le seuil de 0,05 mm.

4. Décompte des accidents où l'information IRCAD n'aurait sans doute pas suffi à éviter l'accident

Les causes de ces accidents ne peuvent être déterminées avec certitude sur la base des seuls bulletins d'analyse des accidents corporels (BAAC), il faudrait avoir examiné les procès verbaux de ces accidents; on remarque toutefois, sur la base des BAAC que pour 163 de ces 370 accidents, un problème est signalé soit sur le véhicule, soit sur le conducteur (soit les deux simultanément).

- 1) Dans 56 accidents, un véhicule est défectueux
- 2) Dans 117 accidents, le conducteur pose un problème : dans 92 cas, son état général est déficient , et/ou dans 57 cas, le conducteur est alcoolisé (taux d'alcool dans le sang supérieur à 0,5 gramme/litre), avec une intersection non vide de 32 cas où les deux problèmes sont mentionnés).

Pour 10 accidents, il y a simultanément un problème au niveau d'un véhicule et d'un conducteur.

Ces 163 accidents où un autre problème que la vitesse est mentionné seraient sans doute en (bonne ?) partie survenus même si un message d'alerte sur la vitesse avait existé entre 1996 et 2005 sur l'ensemble des virages des Côtes d'Armor; par contre, on peut émettre l'hypothèse qu'une vitesse excessive est certainement une cause importante pour les accidents où aucun problème n'est signalé ni sur le véhicule ni sur le conducteur, soit pour 207 accidents (=370 - 163).

Sur le département des Côtes d'Armor, l'enjeu en termes d'accident s'avère être, après ces réductions, de l'ordre de 207 accidents pour 10 ans, soit 20 accidents corporels par an, soit en pourcentage du nombre total d'accidents $3,9\% = 207/5296$ ou encore un pourcentage du nombre d'accidents en virage hors agglomération de $17,8\% = 207/1163$.

Dans quelle proportion les conducteurs les plus rapides ont-ils tenus compte du message ? et leur réaction a-t-elle alors été suffisante ? L'existence d'une meilleure attention du conducteur (même sans modification de la vitesse) n'est mesurable qu'après enquête auprès des conducteurs, Il faut se référer aux documents produits par AJISE pour l'évaluation pour répondre à cette question, tout n'est d'ailleurs pas mesurable.

5. Nombre d'accidents par virage pour les virages où au moins un accident corporel est survenu

Dans les Côtes d'Armor, sur les 1400 accidents en virage survenus entre 1996 et 2005, les Points Routiers et numéros de voies ne sont renseignés que dans 402 accidents répartis sur 356 couples {n°voie, n°PR}, soit 1,13 accidents par virage « cité » dans le BAAC. Cependant l'importance des points routiers manquants ne permet que de conclure que ce chiffre est un minorant de la valeur réelle.

On peut avoir une meilleure estimation du nombre d'accidents par virage en Haute-Normandie, où les points routiers des accidents sont généralement connus.

5.1 Nombre d'accidents par virage en Haute Normandie

Entre 1997 et 2003 (sept ans) sur 8952 accidents, 1852 accidents sont survenus en virage et hors agglomération. Il manque les numéros de 143 PR et de 4 voies. Aussi reste-t-il 1705 accidents répartis sur 1360 virages- chaque sens du virage est distingué, car il faut éventuellement équiper chaque sens du virage.

| | Nombre d'accidents par virage pour un sens donné | | | | | | | Total |
|-----------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| nombre des virages concernés | 1118 | 174 | 48 | 11 | 5 | 2 | 2 | 1360 |
| Fréquence de la classe de virages | 82,2% | 12,8% | 3,5% | 0,8% | 0,37% | 0,15% | 0,15% | 100% |
| Fréquence cumulée décroissante | 100% | 17,8% | 5,0% | 1,47% | 0,66% | 0,29% | 0,15% | |
| accidents concernés | 1118 | 348 | 144 | 44 | 25 | 12 | 14 | 1705 |
| Fréquence des accidents concernés | 65,6% | 20,4% | 8,45% | 2,6% | 1,5% | 0,70% | 0,82% | 100% |
| Fréquence cumulée décroissante | 100% | 34,4% | 14,0% | 5,6% | 2,99% | 1,52% | 0,82% | |

Tableau 3. Accidents et virages selon le nombre d'accidents en virage en Haute-Normandie

(*) dans un nombre réduit d'accident (66) le sens de circulation n'était pas indiqué et a été remplacé par le sens croissant des points routiers.

Il s'agit ici de virages orientés (un virage physique correspondant à deux virages, orientés en sens inverse de circulation.)

En Haute-Normandie, les 2/3 des accidents en virage sont très dispersés (absence de point noir).

5.1.1 Modélisation probabiliste

On pourrait modéliser la distribution du nombre d'accidents par virage par une loi de Poisson : c'est la loi de probabilité qui est utilisée pour modéliser des pannes ; elle est légitime parce que c'est, parmi l'ensemble des lois de probabilité opérant sur des nombres entiers (le nombre de pannes ou le nombre d'accident), celle qui maximise le hasard (l'entropie) pour un nombre moyen donné « m » d'accidents dans une période donnée.

Cette loi donne comme probabilité qu'il y ait « x » accidents dans un virage (x entier positif ou nul)

$$P(x) = \frac{e^{-m} \cdot m^x}{x!}$$

Où x ! (factorielle x) est le produit des x entiers consécutifs 1.2.3...x

Avec 0 ! = 1

La moyenne (espérance) de cette loi est « m »

Notons 'N' le nombre de virages susceptibles d'être accidentés (tous ne le seront pas, en moyenne il y aura P(0).N virages non accidentés).

Il y a $N.P(1)=N.m.e^{-m}=1118$ virages avec un accident

Il y a $N.P(2) = N \cdot \frac{m^2}{2} \cdot e^{-m} = 174$ virages avec deux accidents

En divisant ces deux équations on trouve :

En divisant ces deux équations, on trouve $m = 2 \cdot \frac{174}{1118} = 0,311$

Ce modèle (N=4848 ; m=0,311) entraîne la distribution du nombre d'accidents par virage théorique suivante :

| | Nombre d'accidents par virage pour un sens donné | | | | | | | | Total sauf 0 |
|------------------------|--|---------|--------|-------|------|--------|--------|-----------|-----------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 ou plus | |
| Virages Théorique | 3551.4 | 1105.5 | 172.1 | 17.9 | 1.4 | 8.E-02 | 4 E-03 | 2E-04 | 1297 |
| Virages Observé | | 1118 | 174 | 48 | 11 | 5 | 2 | 2 | 1360 |
| Accidents Théorique | 0 | 1105.47 | 344.10 | 53.55 | 5.56 | 0.43 | 0.03 | 0.001 | 1509.1 |
| Accidents Observé | 0 | 1118 | 348 | 144 | 44 | 25 | 12 | 14 | 1705 |

Tableau 4. Les distributions théoriques et observées des virages et du nombre d'accidents selon le nombre d'accident par virage en Haute-Normandie

Par construction, le modèle donne de bons résultats pour les virages à 1 ou 2 accidents (les nombres de virages ou d'accidents théoriques sont proches de ceux observés).

5.1.2 Les virages où sont survenus plusieurs accidents, en Haute-Normandie

En s'intéressant aux virages avec 3 accidents ou plus, on peut résumer l'information en sommant les colonnes relatives aux virages à 3, n4, 5,6 et 7 accidents.

| | Nombre d'accidents par virage | | | | Total sauf 0 |
|-------------------------------|-------------------------------|---------|--------|-----------|--------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 et plus | |
| Nombre de virages (Théorique) | 3551.4 | 1105.5 | 172.1 | 19.33 | 1297 |
| Nombre de virages (Observé) | | 1118 | 174 | 68 | 1360 |
| Nb d'accidents (théorique) | 0 | 1105.47 | 344.10 | 59.57 | 1509.1 |
| Nb d'accidents (observé) | 0 | 1118 | 348 | 239 | 1705 |

Tableau 5. Les virages avec 3 accidents ou plus (distributions théorique et observée) en Haute-Normandie

Pour la catégorie « accidents supérieurs ou égaux à 3 », la disparité entre le nombre de virages théoriques (19,3) et observés (68) semble contredire la loi de Poisson, ce qui peut s'interpréter par l'existence de virages plus dangereux que les autres, sans doute simplement parce que soumis à une plus forte circulation. Le nombre de ces virages est $68-19,3=48,7$, à « choisir » parmi les 68 virages ayant été le lieu de 3 accidents ou plus. Si les neuf virages ayant été le lieu de 5 accidents ou plus doivent très

probablement être équipés (vu leur fréquence théorique), il n'y a pas d'argument statistique pour « choisir » les 39 autres virages à équiper : il faudrait équiper soit tous les 68 virages où sont survenus trois accidents ou plus, à moins de réunir des arguments à partir d'une analyse « terrain ». Le gain en accident que l'on peut en attendre est égal à la différence entre le nombre des accidents observés et théoriques pour cette colonne « 3 et plus », soit $239-59,57=179,43$ sur 7 ans, soit 10,5% des 1705 accidents.

Ceci veut dire que ces 48,7 virages ont un taux d'accidents supérieur de $3,7=179/48$ à la moyenne.

5.2 Extrapolation du calcul pour les Côtes d'Armor, sur 10 ans

Le calcul précédent a été effectué en Haute-Normandie sur 1705 accidents en 7 ans. Si on essaie de l'étendre sur 10 ans (en prenant cette durée comme l'espérance de vie d'un PMV), on extrapolera $1705*10/7=2435$ accidents en virage. L'équipement des 68 virages les plus accidentés entraînera une diminution potentielle de $179,43*10/7=256$ accidents, (toujours 10,5% des accidents)

Le facteur d'échelle des Côtes d'Armor, comparées à la Haute-Normandie, peut être pris égal au rapport des nombres d'accidents en virage hors agglomération en 10 ans, soit le rapport entre 1163 accidents (dans les Côtes d'Armor) et 2435 (en Haute-Normandie), soit 0,477.

En considérant ce facteur d'échelle comme uniquement spatial, c'est à dire en considérant que le nombre de virages dans les Côtes d'Armor est égal à 47,7% du nombre de virages en Haute-Normandie, à même intensité de trafic et de risque d'accidents, on obtient $0,477*68=32$ virages « orientés » à équiper pour un gain de $122=0,477*256$ accidents.

Les accidents par chaussée humide correspondant à 31,8% des accidents, l'enjeu de l'équipement de 32 virages avec le système IRCAD est ramené à 39 accidents.

En excluant les accidents liés au conducteur ou au véhicule, les accidents supprimés par le système IRCAD ne sont plus que $22=17,8*122$ sur 10 ans, soit en moyenne 0,68 accidents pour 10 ans.

Remarque : Il faut toutefois considérer que ce calcul est fondé sur beaucoup d'hypothèses, explicitées mais non validées.

Il faudrait en particulier valider, par exemple en utilisant la BdR (base de données routières) que le nombre total de virages dans les Côtes d'Armor est de l'ordre du nombre de virages donné par le modèle de Poisson (N= 4848 virages orientés en Haute-Normandie, ou 2313 dans les Côtes d'Armor après application du coefficient 47,7%.

Remarque : On pourrait encore réduire d'un tiers l'enjeu pour tenir compte de la réduction du nombre des accidents corporels survenus en France entre 2000 (par exemple où il y a eu 121 223 accidents corporels, cf [5], page 14) et 2007 (81 272 accidents corporels).

6. Approche par véhicule-kilomètre

En considérant que l'effet PMV persiste de 2 à 4 km, (en moyenne 3 km) on pourrait considérer que le risque d'accident par véhicule-kilomètre passe, grâce au PMV de son niveau « pluie » (estimé, pour tous types d'accidents confondus hors agglomération, en Haute-Normandie à 21,9 accidents pour 100 millions de véhicules kilomètres (cf. le rapport IRCAD WBS 1.6 [1]) à son niveau « beau temps » estimé à 10,4, donc un gain de 11,5 accidents par véhicule-kilomètre.

En considérant que 2 millions de véhicules circulent sur le site (20 millions en 10 ans), et que 17% d'entre eux roulent sur chaussée humide, on trouve un enjeu décennal du PMV égal à :

$17\% * 20 \text{ millions} * 3\text{km} * 11,5 * 10^{-8} = 1,17$ accidents en 10 ans.

Il faut cependant probablement réduire cet enjeu en décomptant les accidents liés au véhicule et au conducteur. Le facteur multiplicatif est alors $0,56 = 207/370$ en faisant référence aux nombres d'accidents en virage sur chaussée humide en Côtes d'Armor concernés par IRCAD (207) ou total (370).

L'enjeu est alors de 0,66 accident par virage (orienté) en 10 ans.

Cette approche conduit à un enjeu par site analogue à celui obtenu dans le paragraphe 4 (122 accidents, pour 32 virages, réduit à 0,68 accident par site) ; cependant la concomitance de ces deux enjeux est sans doute le fruit du hasard, car dans le premier cas on sélectionne les virages (pour traiter les virages les plus accidentés) ; dans le second cas il n'y a pas cette sélection, mais on a tenu compte dans la réduction du risque de l'ensemble des accidents sur 3 km et non seulement des accidents en virage – pour tenir compte des accidents en virage il faudrait multiplier la réduction du risque par véhicule kilomètre utilisée ($11,5 * 10^{-8}$) par le pourcentage d'accidents en virage (30%). On aboutit à un enjeu de 0,2 accidents par véhicule kilomètre.

Remarque : Suivant la même remarque que celle faite à la fin de la section 5, on pourrait réduire cet enjeu d'1/3 pour tenir compte de la baisse du nombre des accidents.

7. Approche conducteur

On pourrait considérer un effet pédagogique du PMV : certains conducteurs ne sont pas conscients du risque par chaussée mouillée et n'adaptent pas leur vitesse. Il faudrait alors classer les conducteurs empruntant le virage (sans les compter deux fois !) selon le nombre de fois où, dans un laps de temps donné (un an, ou pour toute la durée de vie du PMV ?) ils voient le PMV allumé, et avoir une idée de l'impact de cette information sur leur conduite générale. Pour cela il faudrait questionner les usagers sur leur fréquence de fréquentation du site, combiner cette fréquence avec la probabilité de chaussée mouillée : on trouverait alors que le PMV allumé a été vu par un nombre de conducteurs inférieur à $17% * 2$ millions par an, en estimant à 17% la fréquence de chaussée mouillée et à 2 millions le nombre de conducteurs passant sur un site IRCAD ; il faudrait multiplier ce nombre par le risque annuel d'accidents corporels par conducteur (de l'ordre de 1 pour mille, l'ONISR [5] estimant à 37,49 millions le nombre de conducteurs et à 30434 le nombre des accidents corporels sur RN et RD en France métropolitaine pour 2007)), puis par la part d'accident en virage sur chaussée mouillée parmi l'ensemble des accidents corporels (7% réduit à 3,9% en décomptant les accidents dus à un mauvais état du conducteur et du véhicule, et qui n'auraient pas été évités malgré l'alerte).

8. Perspectives pour la généralisation d'un tel système

La possibilité de généraliser le système IRCAD à un ensemble de virages dépend du coût d'installation des équipements ; en ce qui concerne le capteur de chaussée humide, relativement cher, il n'est pas utopique d'envisager une collaboration avec Météo-France – notre correspondant à Trémuson y était tout à fait favorable, collaboration qui permettrait à terme d'envisager le remplacement des capteurs de hauteur d'eau par l'information pluviométrique de Météo-France, utilisée comme donnée d'entrée au modèle de séchage de la chaussée du LCPC-Nantes. Voici quelques remarques exploratoires :

Les informations des radars météo sont fiables dans une zone de rayon 100 km autour du radar (par exemple il y a un radar à Brest). Au-delà la qualité des données diminue, notamment aux périodes de l'année où les nuages sont bas : les nuages bas éloignés du radar échappent au cône de visée. On peut se demander si dans un avenir proche il y aura davantage de radars, et/ou si leur cône de visée sera élargi.

Une image radar est prise toutes les 5 minutes, et Météo-France peut en extraire une image pour toute zone de 1 km² dans le champ du radar. Ces résolutions spatiale et temporelle sont donc excellentes. Cependant, à l'heure actuelle, Météo-France ne distribue qu'une information horaire. Il n'y a sans doute pas d'impossibilité technique à transmettre une information 5 minutes si nécessaire, mais c'est à vérifier.

D'après les premières données radar transmises par Météo-France (et sous réserve d'erreur de notre part) il semble que Météo-France ait calibré le traitement des images radar de façon à être cohérent avec l'information du pluviomètre (là où il existe). Cependant, dans le WBS 1.6 on a vu que l'information

humaine du météorologue (le « temps présent ») complète certaines lacunes des pluviomètres. Pour notre application d'alerte, il serait sans doute judicieux d'utiliser un calibrage du radar plus généreux en pluie, qui s'alignerait plutôt sur une fusion entre l'information du pluviomètre et celle du météorologue.

9. Conclusion

En traitant les virages les plus accidentés (plus de 3 en 7 ans, nombre estimé à 32), nous avons obtenu un enjeu de réduction de 0,68 accident en virage par site traité pour 10 ans (0,068 accident par an). L'enjeu en terme de nombre de tués pourrait représenter 11,2% de cet enjeu en terme d'accidents (source ONISR[5], 2007, pour RN et RD), soit de l'ordre de 0,075 tués pour 10 ans. Avec une approche « véhicule-kilomètre », l'enjeu est le même en considérant que le PMV réduit tous les accidents (en virage ou non) sur 3 km (portée supposée du PMV) ; avec cette approche, en considérant les accidents en virage uniquement, l'enjeu est réduit à 0,2 accidents sur 10 ans. On pourrait réduire cet enjeu d'un tiers, pour tenir compte de la baisse du nombre des accidents survenue depuis 2003. Enfin une approche « conducteur » pourrait s'avérer fructueuse après enquête auprès des usagers pour connaître leur pratique de fréquentation des sites.

10. Références

- [1] Maurice Aron, Ruth Bergel, Jean-Yves Debaène, Laurent Dodet, Patrick Le-Breton,, Emilie Lemaire, Gérard Louah, Guillaume Saint-Pierre, Eric Violette (2006) Sur-risque par temps de pluie, projet IRCAD-SARI, mai
- [2] Aron M., Bergel R., Louah G., Queguiner R., Violette, E.(2008) Sur-risque par temps de Pluie dans les Côtes d'Armor, rapport de convention PREDIT pour le LCPC, projet IRCAD-SARI, 60 pages, février
- [3] Maurice Aron Gérard Louah Éric Violette (2008) Driving risk in vehicle platoons on horizontal curves by dry and rainy weather TRA'2008 Transport Research Arena, Ljubljana (Slovénie)
- [4] Michel Gothié, Thierry Gibrat, Mathieu Le Pen, Mathias Liégeois, Delphine Trotel.(2007). Etat de mouillage critique CETE de Lyon pour le LCPC, Programme SARI / IRCAD, livrable 3.2
- [5] ONISR (2007) La sécurité routière en France. Bilan de l'année 2007. La documentation française, 270 pages

Annexe: Comparaison entre la pluviométrie durant l'expérimentation IRCAD-SARI en 2008 et la pluviométrie 1996-2005 dans les Côtes d'Armor

Selon que le pluviomètre indique ou non de la pluie, et selon que le capteur de hauteur d'eau indique ou non une hauteur d'eau significative, quatre configurations apparaissent :

- a) Les informations fournies par le pluviomètre et le capteur de hauteur d'eau sont concordantes, lorsque :
 - le pluviomètre n'indique pas de pluie, le capteur Vaisala n'indique pas de hauteur d'eau élevée,
 - le pluviomètre indique de la pluie, et le capteur Vaisala indique une hauteur d'eau élevée.

- b) Le cas où le pluviomètre n'indique pas de pluie, mais où la hauteur d'eau (Vaisala) est strictement positive n'est pas anormal ; il peut correspondre à la fin d'un épisode pluvieux ; cependant on sait que le pluviomètre ne détecte pas toute la pluie : dans le rapport WBS 1.6.2, la part de pluie (en durée) à Binic, entre 1997 et 2005, qui était de 5.28% au pluviomètre avait été portée à 8% en intégrant l'observation du météorologue, voire à 8,7% en tenant compte de la bruine.
- c) Le dernier cas- le pluviomètre indique de la pluie, mais la hauteur d'eau (Vaisala) n'est pas significative
 - constitue une anomalie pour partie explicable :
 - (i) par la différence entre la périodicité d'enregistrement des mesures du pluviomètre (toutes les six minutes) et du capteur Vaisala (toutes les minutes): toute période de 6 minutes est considérée comme pluvieuse dans son intégralité dès lors que l'auget, de contenance 0,2 mm, s'est retourné sous l'effet de la pluie. Le début et/ou la fin d'un événement pluvieux ne correspondent pas exactement à un début ou à une fin de période 6 minutes, s'il ne pleut, par exemple qu'à partir de H+ 3 minutes, toute la période {H.. H+5} sera considéré comme pluvieuse, alors qu'il ne pleut pas en H ni en H+1. Pour un événement pluvieux donné, l'erreur moyenne sera de deux minutes au début et de deux minutes à la fin, soit 4 minutes (l'erreur est toujours en excès). La durée moyenne d'un événement pluvieux étant de 30 minutes, l'estimation par excès de la période pluvieuse sera de $4/30 = 13,3\%$, ce qui explique une part des minutes « pluie & chaussée sèche »,
 - (ii) en partie par des erreurs de mesure ou par des décalages temporels entre les deux capteurs,
 - (iii) enfin par la distance entre le pluviomètre Météo-France et le site où est installé le capteur Vaisala (une dizaine de kilomètres entre Trémuson, près de St-Brieuc, et Binic-St-Quay-Portrieux).

A1. Analyse à Binic

Les deux tableaux suivant fournissent l'occurrence et la fréquence des quatre configurations présence/absence de pluie/chaussée mouillée. Dans les deux tableaux suivants, la chaussée est considérée comme mouillée pour toute hauteur d'eau strictement positive.

| Vaisala Pluviomètre | Minutes (sec) | Minutes (mouillé) | total minutes |
|------------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Beau | 121296 | 24704 | 146000 |
| Pluie | 2197 | 7846 | 10043 |
| Total | 123493 | 32550 | 156043 |

Tableau 6. Convergence entre le pluviomètre et le capteur de hauteur d'eau à Binic en durée

Le tableau suivant reprend les informations du tableau précédent sous forme de pourcentages :

| Vaisala Pluviomètre | Sec | Mouillé | total |
|------------------------|-------|---------|--------|
| Beau | 77.7% | 15.8% | 93.6% |
| Pluie | 1.4% | 5.0% | 6.4% |
| Total | 79.1% | 20.9% | 100.0% |

Tableau 7. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau à Binic

A1.1 L'anomalie « pluie et chaussée sèche »

L'anomalie « pluie et chaussée sèche » correspond à : $\frac{2197}{2197 + 7846} = \frac{1,4\%}{6,4\%} = 21,9\%$ des périodes de pluie, laissant penser à une sous-estimation de la hauteur d'eau par le capteur Vaisala.

Remarque : Si l'on passe à un seuil de hauteur d'eau de 0,02 mm ou de 0,05 mm ce pourcentage croît de 21,9% à respectivement à 23,9%=1,54%/6,44% et 30%=1,93%/6,44% comme le montrent les deux tableaux suivants :

| Vaisala Pluviomètre | Sec | Mouillé | total |
|------------------------|--------|---------|--------|
| Beau | 79,96% | 13,60% | 93,56% |
| Pluie | 1,54% | 4,90% | 6,44% |
| Total | 81,50% | 18,50% | 100% |

Tableau 8. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau >0,02 mm à Binic

| Vaisala Pluviomètre | Sec | Mouillé | total |
|------------------------|--------|---------|--------|
| Beau | 84,61% | 8,96% | 93,56% |
| Pluie | 1,93% | 4,51% | 6,44% |
| Total | 86,53% | 13,47% | 100% |

Tableau 9. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau >0,05 mm à Binic

A1.2 Pluie (pluviomètre) durant l'expérimentation et pluie (pluviomètre) durant l'année 2008

A Trémuson, le pluviomètre en 2008 indique la pluie 5,73% du temps et un peu plus (6,44%) durant l'expérimentation.

Une simple règle de trois corrige alors le pourcentage de chaussée humide enregistré (20,9%)

en $\frac{5,73}{6,44} \times 20,9\% = 18,6\%$ (estimation de la chaussée humide à Binic pour 2008).

Au seuil de 0,02 mm de pluie, le pourcentage de temps de chaussée humide s'élève en 2008 à

$\frac{5,73}{6,44} \times 18,50\% = 16,5\%$.

Au seuil de 0,05 mm de pluie, le pourcentage de temps de chaussée humide s'élève en 2008 à $\frac{5.73}{6.44} \times 13,47\% = 12,0\%$.

A1.3 Comparaison entre les indications du pluviomètre en 2008 et celles des années 1997-2005

Le pluviomètre à Trémuson indique de la pluie durant 5,28% du temps entre 1997 et 2005.

En utilisant cette durée relative de pluie, celle observée dans l'expérimentation, et la durée relative de chaussée humide durant l'expérimentation, la règle de trois suivante fournit une estimation du pourcentage de temps où la chaussée a été humide entre 1997 et 2005 enregistré (20,9%).

$$\frac{5.28}{6.44} \times 20.9\% = 17,1\%$$

La hauteur d'eau est estimée dépasser 0,02 mm en 2008 durant $15,2\% = \frac{5.28}{6.44} \times 18.50\%$ du temps..

La hauteur d'eau est estimée dépasser 0,05 mm en 2008 durant $11,0\% = \frac{5.28}{6.44} \times 13.47\%$ du temps.

Ces chiffres devront être précisés à partir de l'ensemble des informations VAISALA recueillies dans IRCAD-SARI.

A2. Analyse à Lannion

Cette analyse n'est que partielle, parce qu'on ne dispose pas ici du pluviomètre pour la période 1997-2005.

Dans les deux tableaux suivants, la chaussée est considérée comme mouillée pour toute hauteur d'eau strictement positive.

| Vaisala Pluviomètre | minutes sec | minutes mouillé | total (minutes) |
|------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Beau | 100612 | 28502 | 146000 |
| Pluie | 1320 | 6178 | 10043 |
| Total | 101932 | 34680 | 136612 |

Tableau 10. Convergence entre le pluviomètre et le capteur de hauteur d'eau à Lannion en durée

| Vaisala Pluviomètre | Sec | Mouillé | total |
|------------------------|-------|---------|--------|
| Beau | 73.6% | 20.9% | 94.5% |
| Pluie | 1.0% | 4.5% | 5.5% |
| Total | 74.6% | 25.4% | 100.0% |

Tableau 11. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau à Lannion

A2.1 L'anomalie « pluie et chaussée sèche »

L'anomalie « pluie chaussée sèche » correspond à $\frac{1320}{1320+6178}=17\%$ des périodes de pluie (au

pluviomètre de Lannion), la chaussée est sèche (ou tout au moins la hauteur d'eau est inférieure à 0,05 mm au capteur Vaisala de St Michel en Grève. Les explications sont analogues à celles présentées plus haut pour le site de Binic.

Remarque : Si l'on passe à un seuil de hauteur d'eau de 0,02 mm ou de 0,05 mm ce pourcentage croît de 17% à respectivement 19,3%= 1,06%/5,49% et à 23,6% = 1,30%/5,49 comme le montrent les deux tableaux suivants :

| Vaisala Pluviomètre | Sec | mouillé | total |
|------------------------|--------|---------|--------|
| Beau | 75,51% | 19,00% | 94,51% |
| Pluie | 1,06% | 4,43% | 5,49% |
| Total | 76,57% | 23,43% | 100% |

Tableau 12. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau > 0,02 mm à Lannion

| Vaisala Pluviomètre | Sec | mouillé | total |
|------------------------|--------|---------|--------|
| Beau | 79,31% | 15,20% | 94,51% |
| Pluie | 1,30% | 4,19% | 5,49% |
| Total | 80,60% | 19,40% | 100% |

Tableau 13. Distribution des durées des quatre configurations pluviomètre/hauteur d'eau > 0,05 mm à Lannion

A2.2 Pluie (pluviomètre) durant l'expérimentation et pluie (pluviomètre) durant l'année 2008

À Lannion, le pluviomètre en 2008 indique la pluie 6,4% du temps et seulement 5,4% durant l'expérimentation

La règle de trois suivante fournit une estimation du pourcentage de chaussée humide en 2008 à partir du

pourcentage de chaussée humide enregistré durant l'expérience (25,4%) $\frac{6.4}{5.5} \times 25.4\% = 29,6\%$

On peut estimer que la hauteur d'eau dépasse 0,02 mm en 2008 pour $27,3\% = \frac{6.4}{5.49} \times 23.43\%$

On peut estimer que la hauteur d'eau dépasse 0,05 mm en 2008 pour $22,6\% = \frac{6.4}{5.49} \times 19.40\%$

Ces chiffres devront être précisés à partir de l'ensemble des informations VAISALA recueillies dans IRCAD-SARI ;

Comme on ne dispose pas ici des indications du pluviomètre à Lannion pour 1997-2005, on ne peut pas estimer le pourcentage de chaussée humide à Lannion pour 1997-2005 ;

A3. Comparaison entre les deux sites

La comparaison entre les deux sites (Binic et Lannion) montre une disparité entre les deux sites nettement plus forte en ce qui concerne la chaussée humide que pour la pluie :

- durant l'année 2008 la durée de pluie au pluviomètre à Binic (5.73) est légèrement inférieure à celle de Lannion (6,4%) soit $1-5,73\%/6,4\% = 10\%$ de moins,
- cependant les durées de chaussée humide estimées pour 2008 à Binic (12 % au seuil de 0,05 mm) sont nettement inférieures à celle de Lannion (22,6% pour le même seuil). Un seuil de 17% (moyenne entre 12% et 22%) est choisi mais devra être vérifié ultérieurement.