

Optimisation de la gestion de la route du littoral à la Réunion vis-à-vis du risque de chutes de blocs

Marcel RAT

*Ingénieur général des ponts et chaussées honoraire
Ministère de l'Équipement*

marcel.rat@lcpc.fr

■ RÉSUMÉ

La route du littoral à deux fois deux voies sur l'île de la Réunion est située, sur une longueur de treize kilomètres, au pied d'une falaise atteignant deux cents mètres de haut. Il a été nécessaire de définir des règles de gestion de cette route pour diminuer le risque lié aux chutes de blocs. La règle actuelle (fermeture de la chaussée côté amont la plus exposée pendant trois jours si la pluie dépasse quinze millimètres en vingt-quatre heures) est devenue très pénalisante, compte tenu de l'augmentation de la circulation. Grâce aux relevés très précis des chutes pendant les cinq dernières années, il a été possible de fournir au gestionnaire de cette infrastructure les éléments pour définir de nouvelles règles. Le risque actuel, hors période de basculement en période sèche ou humide, a d'abord été estimé : à chaque instant, la probabilité de chutes doit être la même, le phénomène suivant une loi de Poisson. Les événements passés ont ensuite été ré-analysés. En combinant ces deux approches, les risques liés à différents scénarios de gestion ont été appréciés.

Optimized facility management of Reunion Island's Coastal Highway with respect to the risk of rockfalls

■ ABSTRACT

Reunion Island's four-lane Coastal Highway runs, along a 13-km length, at the base of a cliff towering two hundred meters high. It proved necessary to define rules for managing this road in order to lessen the risk of falling rocks. The current rule (closing of the roadway on the cliff side over the most heavily-exposed stretches for three days should precipitation exceed 15 millimeters over any 24-hour period) has become highly detrimental, in light of increased traffic levels. With a series of high-precision readings of rockslide incidents over the past five years, it is now possible to provide the facility manager the input for defining new rules. The current risk, outside of the transition between dry and wet periods, was first estimated; at each point in time, the probability of a rockslide must be equivalent, since the phenomenon obeys a Poisson's law. Past events could be reexamined next. By combining these two approaches, the risks associated with various facility management scenarios have been assessed.

INTRODUCTION

La route nationale (RN) n° 1 de l'île de la Réunion, pour sa partie située entre Saint-Denis et La Possession, communément appelée « route du littoral », d'une longueur de treize kilomètres, est construite au pied d'une falaise d'où tombent régulièrement des blocs rocheux qui affectent la sécurité des usagers (**figure 1**).

figure 1
Route du littoral de l'île de la Réunion.



IMPORTANCE DES CHUTES DE BLOCS

Les chutes de matériaux issus de la falaise représentent en moyenne 10 000 t par an, mais une très grande proportion (99 %) d'entre eux est piégée par les fosses et les gabions de protection situés entre la chaussée et la falaise. Les masses arrivant sur les chaussées ont été en moyenne annuelle de 147 t sur la chaussée côté falaise et de 31 t sur la chaussée côté mer pendant la période 1992-2002. Cette masse correspond, en moyenne, à cent blocs par an. On constate aussi que la répartition des chutes entre les deux chaussées est à peu près dans un rapport de 4 à 1 entre la chaussée côté falaise et la chaussée côté mer. Le **tableau 1** récapitule les chutes pour la période 1998-2002.

tableau 1
Importance des chutes de blocs.

| | Nombre de chutes de 1998 à 2002 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Chaussée côté falaise | 588 |
| Chaussée côté mer | 160 |
| Total | 758 |

EXPLOITATION DE LA ROUTE

Pour limiter le risque, en partant de la constatation que les chutes sont plus nombreuses en période de pluie, l'État a mis en place dès 1983 une procédure dite de basculement qui reporte le trafic de la chaussée côté falaise sur la chaussée côté mer en cas de pluviométrie importante. Elle est la suivante : dès que la hauteur de pluie relevée à l'un des trois pluviomètres situés aux PR 3,2, 5,5 et 13 de la route dépasse quinze millimètres en vingt-quatre heures, il est procédé à la fermeture de la chaussée côté falaise et la circulation est reportée sur la chaussée côté mer, chaussée sur laquelle le risque est quatre fois plus faible. La durée de fermeture est en principe de trois jours consécutifs (soixante-douze heures) à partir de la fin de la dernière pluie qui a donné lieu au dépassement du seuil de quinze millimètres. Cette réouverture n'est possible que s'il n'a pas été constaté de nouveau pendant ces trois jours une pluviométrie supérieure à quinze millimètres en vingt-quatre heures,

auquel cas les soixante-douze heures sont reportées d'autant, à la nuance près que les petites pluies isolées d'intensité inférieure à un millimètre en deux heures ne donnent pas lieu à un tel report. La route est aussi totalement fermée dans les cas exceptionnels tels que les cyclones.

Cette procédure a été appliquée soixante-sept fois pendant les années 1998 à 2002, ce qui correspond à une moyenne annuelle de treize ; le nombre de jours de fermeture de la chaussée côté falaise a été en moyenne annuelle de cinquante-huit. De ce point de vue, l'année 2003 a été particulièrement mauvaise puisque le nombre de jours de fermeture a été de soixante-seize. Ceci crée des perturbations importantes de l'exploitation, malgré l'utilisation de la chaussée côté mer en mode 2 + 1 alterné depuis 1999. Cependant, cette procédure n'a qu'une efficacité limitée et ne protège pas les usagers des chutes qui se produisent sur la chaussée côté mer, ni de celles qui se produisent en permanence en l'absence de pluie.

Cette efficacité peut être mesurée par le nombre de chutes qui se sont produites pendant les périodes de fermeture (côté falaise), soit 334 sur un total de 588 en cinq ans. Ces nombres montrent que, grâce à un temps de fermeture de $58/365 = 16\%$, on se protège de 57% des chutes. Encore faut-il compenser ces calculs par le fait que les usagers transférés sur la chaussée côté mer ont été soumis au risque des chutes constatées sur cette chaussée pendant les mêmes périodes, soit soixante-dix-huit, ce qui ramène le taux d'efficacité à 43% . Présenté d'une autre manière, sans procédure de basculement, l'aléa aurait été de 0,32 chutes par jour alors que la procédure de basculement le réduit à 0,18.

ÉTABLISSEMENT DE LA PROCÉDURE

La procédure actuelle a été fixée d'une manière empirique en 1983. À partir des années 1990, un relevé des chutes a été effectué par les services d'entretien de la route.

En 1997, sur demande de la direction départementale de l'Équipement (DDE), Alfonsi et Durville [1] ont exploité les relevés 1992-1996 avec pour objectif de définir une règle de gestion optimale. Ils ont étudié, en fonction de différents scénarios de gestion de la route, la variation de deux paramètres α et p_f :

$$\alpha = \frac{\text{nombre de chutes côté falaise sur route ouverte}}{\text{nombre de chutes total côté falaise}}$$
$$p_f = \frac{\text{durée cumulée des basculements}}{\text{durée totale considérée}}$$

α mesure l'efficacité des règles de basculement à éviter les chutes de pierres sur route ouverte, p_f la proportion de temps où la route est en état basculé.

Il est bien évident que ces deux paramètres varient en sens opposés.

Les scénarios étudiés étaient relativement simples, du même type que celui mis en œuvre : si la pluviométrie cumulée sur X heures dépasse une valeur Y, la route est alors fermée pendant Z jours. La **figure 2** récapitule leurs résultats. Elle montre que l'on ne peut pas définir un optimum unique, mais que la règle adoptée est un bon compromis entre le risque et la durée de fermeture de la chaussée.

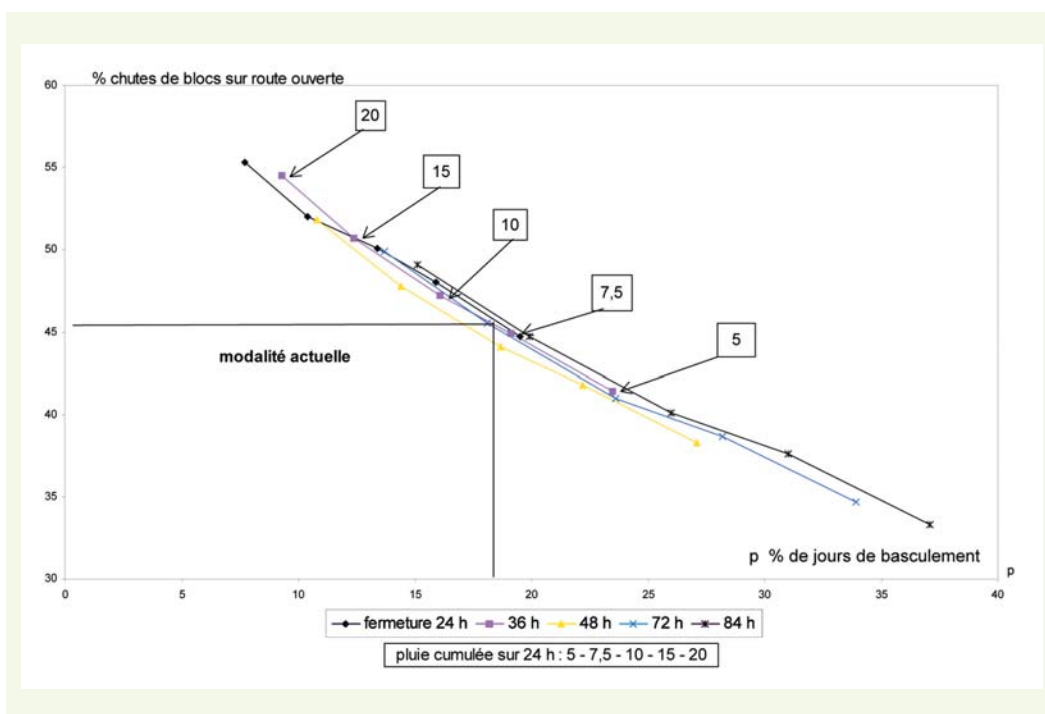
L'impact économique de plus en plus important des basculements, conséquence de l'augmentation de la circulation, la réalisation d'une première tranche de travaux entre les PR 0 et 3,5 et la perspective de nouveaux travaux importants de protection de la falaise ont conduit la DDE de la Réunion à demander au Centre d'études de l'équipement (CETE) Méditerranée de reprendre l'étude à partir d'une meilleure connaissance du phénomène (cinq années de relevés supplémentaires).

QUALITÉ DU RECENSEMENT

Depuis 1998, le relevé des chutes de blocs est plus précis, les agents d'exploitation de la DDE faisant des tournées de surveillance toutes les deux heures environ : l'heure, le lieu et l'importance

figure 2

Diagramme (% fermeture de la route, % chute de blocs) sur route ouverte (d'après [1]).



des chutes sont maintenant mieux connus. Pour comparer la qualité des relevés, le rapport entre le nombre total de blocs et le nombre de blocs de masse supérieure à 10 kg a été retenu ; la comparaison a été faite pour les périodes 1992-1997 [1] et 1998-2002 (tableau 2) pour l'ensemble de la route et pour deux sections qui montraient une augmentation importante du nombre de chutes observées. Comme il n'y a pas de raisons objectives d'un changement de granularité des blocs, la différence 1,33 et 2,11 ou 1,42 et 2 de ces rapports souligne l'amélioration des relevés (les petits blocs n'étaient pas relevés d'une manière systématique). Aussi, pour avoir des données homogènes, la nouvelle analyse a été conduite uniquement à partir des observations 1998-2002, quelques vérifications sommaires étant faites en intégrant, dans un second temps, les relevés antérieurs.

tableau 2

Relevés des chutes de blocs (rapport : nombre total des blocs/nombre de blocs > 0,01 t).

| Période | Nombre de blocs | Poids cumulé des blocs (t) | Nombre de blocs > 0,01 t | Poids cumulé des blocs > 0,01 t | par an Nombre total de blocs | par an Nombre de blocs > 0,01 t | Rapport |
|-----------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|
| Ensemble de la route | | | | | | | |
| 1992-1997 | 589 | 675,43 | 441 | 675,16 | 98 | 73,5 | 1,33 |
| 1998-2002 | 610 | 471,14 | 289 | 470,29 | 122 | 57,8 | 2,11 |
| Sections 7 et 8 | | | | | | | |
| 1992-1997 | 139 | 63,70 | 98 | 63,62 | 23 | 16 | 1,42 |
| 1998-2002 | 203 | 48,74 | 101 | 48,48 | 40 | 20 | 2 |

Le CETE Méditerranée (M. Battista) a repris tout d'abord les principes adoptés dans l'étude citée précédemment (caractérisation de l'efficacité d'un critère de gestion par le couple α , p_f), mais en testant des scénarios beaucoup plus complexes pour prendre en compte l'historique de la pluviométrie.

Exemple de scénario : si le cumul de la pluie sur quatorze jours est supérieur à 200 mm et si le cumul sur trente heures est inférieur à 38 millimètres et si le cumul sur un jour est supérieur à 22 millimètres, la route sera fermée pendant deux jours et demi.

Chacun de ces scénarios conduit à un point dans le diagramme α , p_f (figure 3). Ce diagramme montre qu'il y a des scénarios de gestion plus performants (moins de chutes de blocs pour la même

figure 3

Risque de chutes de blocs sur route ouverte en fonction du pourcentage de fermeture de la route pour différents scénarios de gestion.

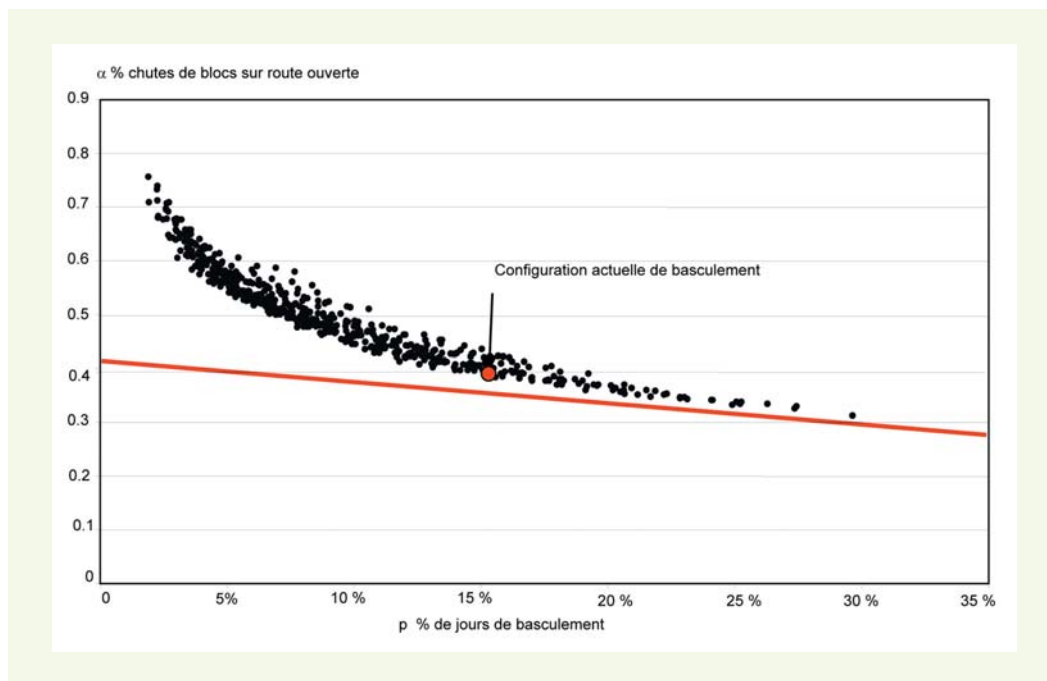
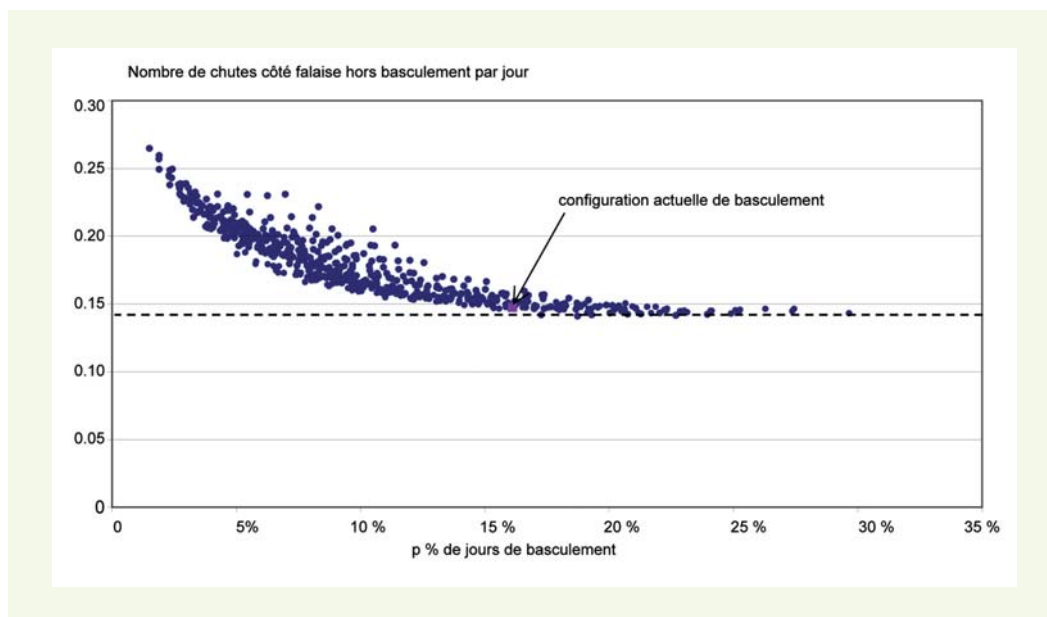


figure 4

Nombre de chutes de blocs par jour sur route ouverte en fonction du pourcentage de fermeture de la route, pour différents scénarios de gestion.



durée d'ouverture de la route), mais il met surtout en évidence l'existence d'une asymptote à partir d'une certaine durée de fermeture, de l'ordre de 15 %.

Ce diagramme peut être présenté d'une manière différente, en mettant en ordonnée le nombre de blocs qui tombent par jour, chaussée côté falaise ouverte : cette présentation met en évidence qu'au-delà de 15 % de temps de fermeture, l'aléa de chutes de blocs par jour est constant, de l'ordre de 0,14 chute par jour (figure 4). Pour diminuer le risque, on peut choisir au hasard des jours de fermeture supplémentaires : les chutes ne dépendent plus de la pluviométrie et la valeur mise en évidence correspond à un « bruit de fond ». Ce graphique montre aussi que la procédure actuelle est proche d'un optimum, puisque l'aléa résiduel de chutes sur route ouverte est très voisin du bruit de fond.

QUANTIFICATION DU BRUIT DE FOND

Compte tenu du climat de l'île de la Réunion, deux saisons ont été considérées : une saison « humide », généralement de décembre à avril, caractérisée par des pluies cycloniques, s'étalant sur plusieurs

jours et une saison « sèche », de pluviométrie caractérisée par des pluies journalières. Le début et la fin de la saison humide variant d'une année à l'autre, un critère pluviométrique a été choisi pour définir ces périodes : cumul des pluies sur quatorze jours supérieur à soixante millimètres.

figure 5

Saison sèche : calage sur la période 3,5-20 jours ; pas de temps 0,5 jour ; en moyenne, 1 chute tous les 5,9 jours.

figure 6

Saison sèche : calage sur la période 5-20 jours ; pas de temps 1 jour ; en moyenne, 1 chute tous les 5,9 jours.

figure 7

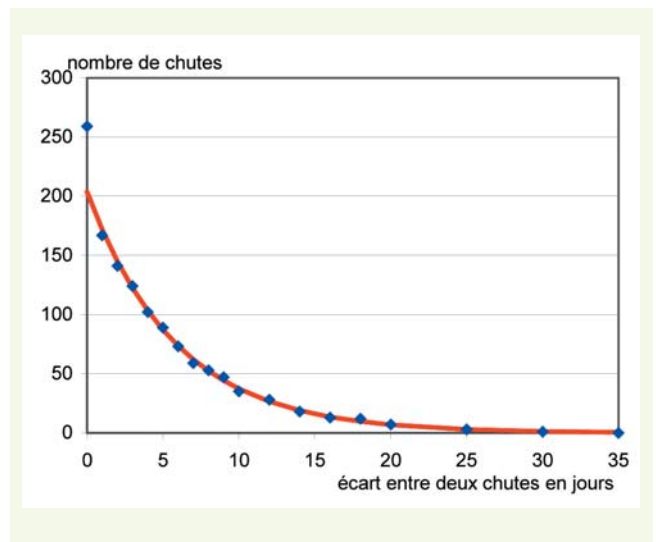
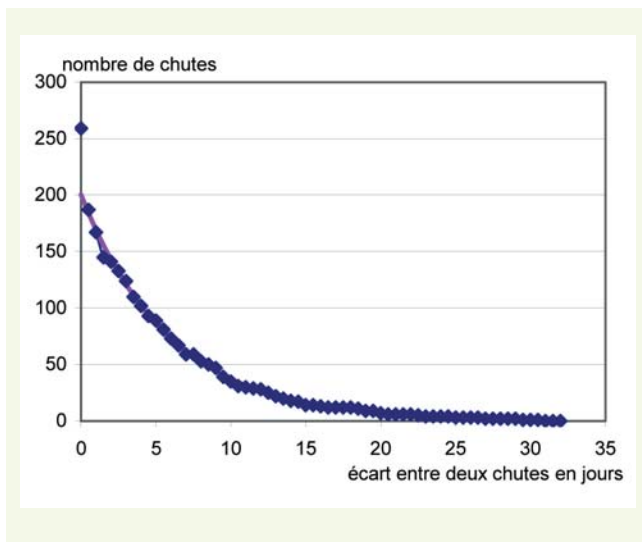
Saison humide : calage sur la période 7-20 jours ; pas de temps 0,5 jour ; en moyenne, 1 chute tous les 5,4 jours.

figure 8

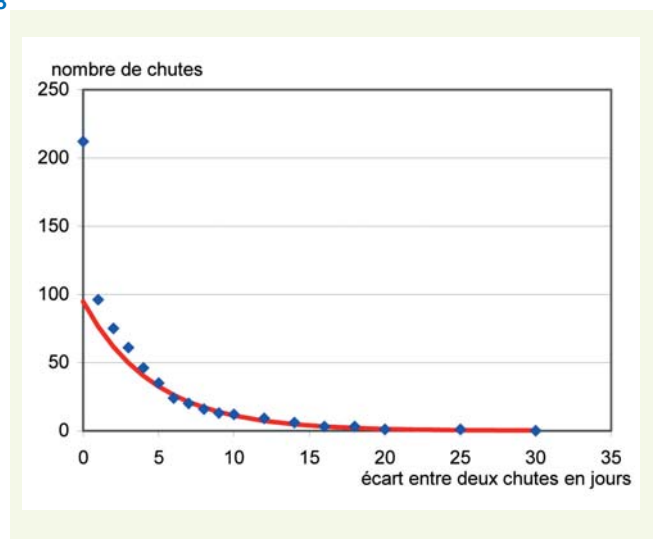
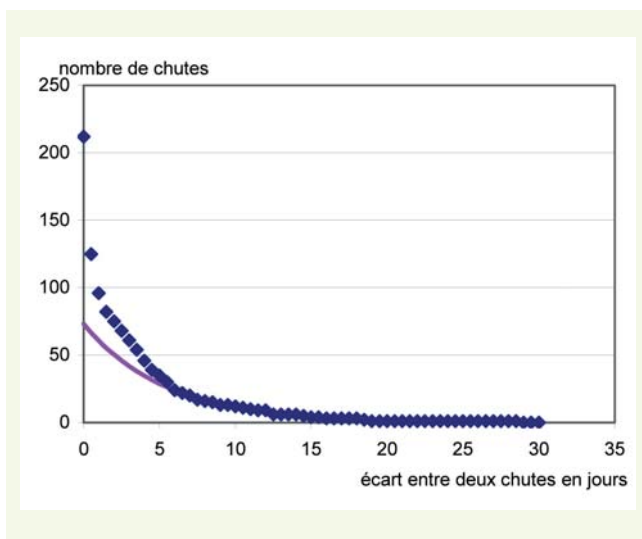
Saison humide : calage sur la période 5-20 jours ; pas de temps 1 jour ; en moyenne, 1 chute tous les 4,7 jours.

Si les chutes ne dépendent pas de la pluie ou d'un autre phénomène naturel (vieillessement de la falaise), la probabilité de chutes à un instant donné est constante, ce qui se traduit en terme de probabilité par une distribution de Poisson du nombre de chutes en fonction du temps. Plutôt que de raisonner sur cette loi, le temps qui sépare deux chutes a été considéré. Pour un phénomène suivant la loi de Poisson, la distribution de ces écarts suit une loi exponentielle décroissante. L'analyse a été faite pour les deux saisons.

Pour éliminer l'influence de la pluie, le calage de la fonction exponentielle a été fait pour des écarts entre chutes de 3,5, 5 ou 7 jours, le pas de temps étant de 0,5 ou 1 journée. En saison sèche, la différence est très faible entre les calages sur les périodes 3,5-20 jours et 5-20 jours. On observe d'ailleurs sur les **figures 5 et 6** que ce calage est bon dès un jour d'écart : l'effet de la pluie est à très court terme et consiste en un lessivage de la falaise. En saison humide, les **figures 7 et 8** montrent au contraire que le calage à partir de 5 jours est moins bon que celui à partir de 7 jours et donc que l'effet des pluies se fait sentir jusqu'à 5 jours. En dehors de l'effet de la pluie, l'écart moyen entre deux chutes est de 5,9 jours en saison sèche et de 5,4 en saison humide ; ces deux valeurs sont très voisines ce qui, indirectement, conforte l'hypothèse émise.



5 6
7 8



ÉTUDE DES BASCULEMENTS

Pour compléter cette analyse, le CETE Méditerranée a repris l'historique de tous les événements pluvieux (67) ayant donné lieu à basculement : pour chaque basculement, il a établi la distribution de la pluie et des chutes de pierres par tranches de deux heures sur une période allant de deux jours avant le basculement à un jour après la fin de celui-ci (figure 9). L'analyse a été complétée par le décompte des chutes se produisant, d'une part, pendant le délai nécessaire à la mise en œuvre du basculement après l'alerte et, d'autre part, pendant la pluie (tableau 3). Les données fournies par la DDE montrent en effet que le délai moyen de mise en œuvre est de 3 h 30, ce qui est loin d'être négligeable.

Afin de ramener les valeurs à une moyenne pour chaque événement et de pouvoir les comparer avec le nombre de chutes moyen qui se produit en vingt-quatre heures en dehors des événements pluvieux, ces valeurs ont été divisées par 67, ce qui donne une intensité du nombre de chutes par tranche de temps. Le tableau 4 présente cette analyse et montre que :

- le risque est très important pendant la période de mise en place du basculement,
- les chutes se produisent surtout pendant la pluie et les premières vingt-quatre heures (plus de 86 %).

figure 9
Reconstitution d'un événement pluvieux avec basculement.

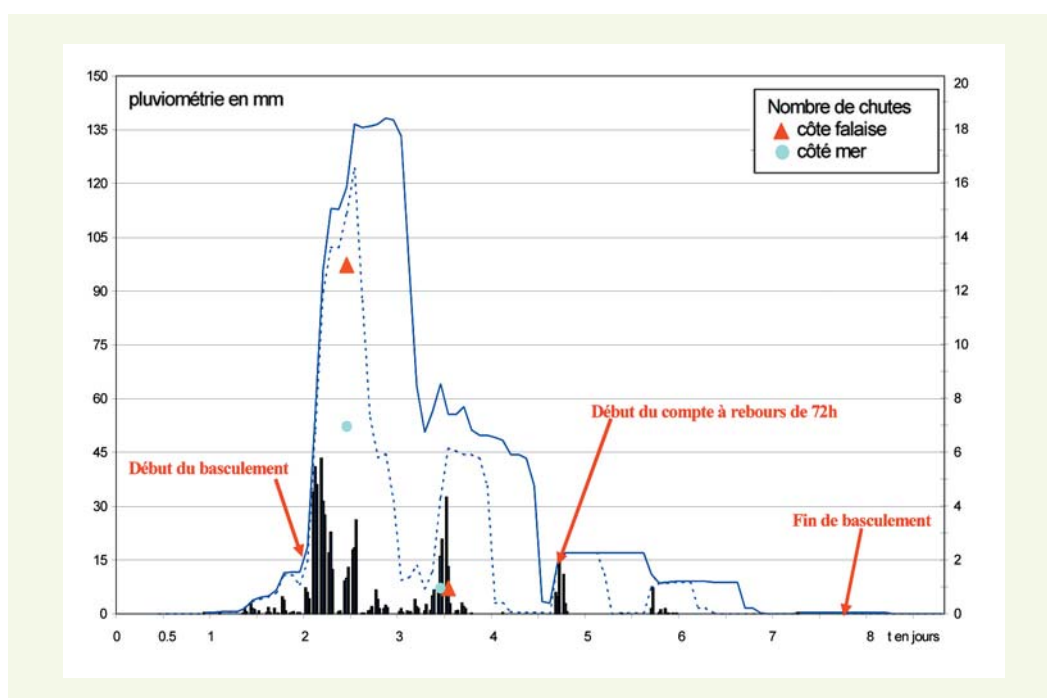


tableau 3
Répartition des chutes en fonction du temps.

| | Mise en place du basculement | Du basculement au début des 72 h | 0-24 h | 24 h-48 h | 48 h-72 h |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Chutes côté falaise | 27 | 221 | 65 | 29 | 19 |
| Chutes côté mer | 9 | 58 | 13 | 3 | 2 |
| Total | 36 | 279 | 78 | 32 | 21 |

tableau 4
Nombre moyen de chutes par événement en fonction du temps.

| | Équivalent en 24 h pendant la mise en place du basculement | 0-24 h | 24 h-48 h | 48 h-72 h | Jour moyen en période sèche |
|---------------------|--|--------|-----------|-----------|-----------------------------|
| Chutes côté falaise | 2,4 | 0,9 | 0,4 | 0,28 | 0,15 |
| Chutes côté mer | 0,8 | 0,2 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| Total | 3,2 | 1,1 | 0,5 | 0,3 | 0,17 |

La pluie a donc avant tout un effet de lessivage de la falaise qui accélère la chute de certains blocs par rapport à un processus de production permanent, même en dehors des événements pluvieux. Dans ces conditions, l'intensité de la pluie doit avoir un rôle important : le **tableau 5** différencie les valeurs obtenues par tranche de temps en les décomposant entre un seuil de pluie sur vingt-quatre heures compris entre quinze et trente millimètres et un seuil de pluie supérieur à trente millimètres pour les chutes côté falaise.

Ces résultats confirment que, pour les pluies d'intensité moyenne, il y a très peu de chutes au-delà de vingt-quatre heures, contrairement aux pluies importantes. Ceci a conduit à simuler le scénario de gestion suivant :

- pour une pluie comprise entre 15 et 30 mm en 24 h, fermeture de la route pendant 24 h,
- pour une pluie d'intensité supérieure à 30 mm, fermeture de la route pendant 72 h, comme actuellement.

Le **tableau 6** donne le résultat de cette simulation. Le **tableau 7** présente la même analyse, en intensité de chutes par tranche de vingt-quatre heures. Ces 2 tableaux montrent que le nombre de basculements augmente, car certains événements sont dédoublés ; les pluies de faible intensité entraînent plus de basculements que les fortes, mais elles ne sont responsables que de 38 % du nombre de chutes. Le **tableau 7** permet la comparaison avec le bruit de fond.

Cette gestion aurait augmenté le nombre de chutes sur la chaussée côté falaise de 17, mais aurait diminué le nombre de jours de basculement de l'ordre de 83 en 5 ans. Il a été vu que, hors des pluies, on observait en moyenne une chute tous les 5,9 jours. Si ces 83 jours avaient été des jours non soumis à l'influence de la pluie, on aurait obtenu $83/5,9 = 14$ chutes, valeur à comparer aux 17 chutes constatées. Le maintien de la fermeture pendant soixante-douze heures au lieu de vingt-quatre pour des pluies d'intensité moyenne n'améliore la sécurité que très faiblement : $17 - 14 = 3$ chutes sur 334, soit une diminution de 1 % du risque moyen sur l'année. À titre comparatif, ce risque supplémentaire est nettement plus faible que celui auquel sont soumis les usagers pendant la mise en place du basculement, à savoir 27 chutes soit un ratio de 8 % du risque annuel (un gain d'une demi-heure sur la mise en place du basculement procurerait le même gain).

tableau 5

Nombre de chutes du côté falaise en fonction de l'intensité de la pluie.

| | Mise en place du basculement | Du basculement au début des 72 h | 0-24 h | 24 h-48 h | 48 h-72 h |
|-------------|------------------------------|----------------------------------|--------|-----------|-----------|
| 15 < i < 30 | 11 | 80 | 31 | 7 | 6 |
| i > 30 | 16 | 144 | 34 | 22 | 13 |

tableau 6

Simulation de la gestion en ajoutant comme critère l'intensité de la pluie.

| | Nombre de basculements | Mise en place du basculement | Du basculement au début des 72 h | 0-24 h | 24 h-48 h | 48 h-72 h |
|-------------|------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------|-----------|-----------|
| 15 < i < 30 | 47 | 15 | 69 | 39 | 11 | 6 |
| i > 30 | 31 | 20 | 135 | 34 | 22 | 13 |

tableau 7

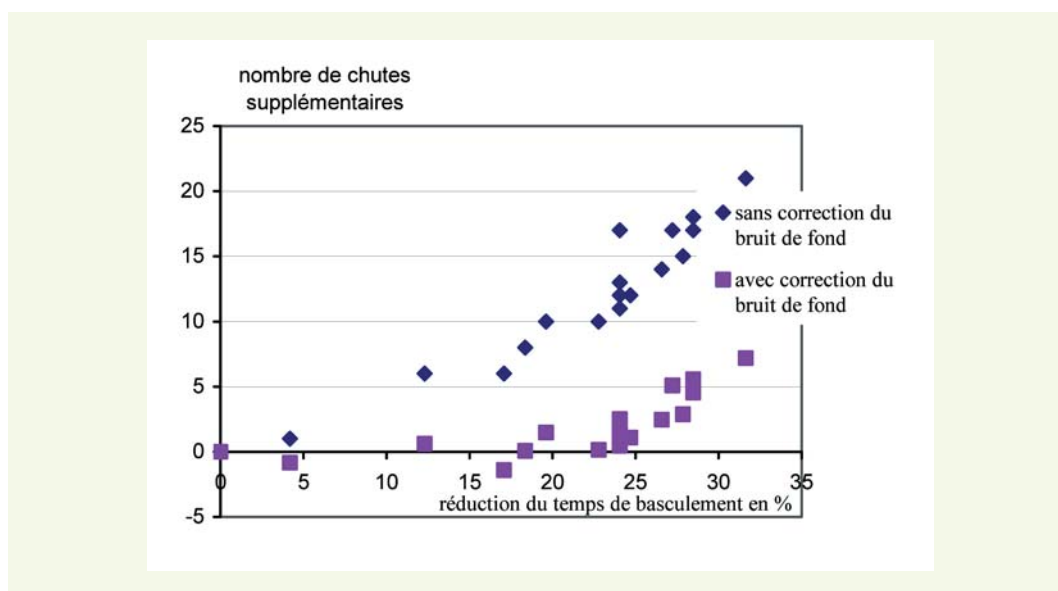
Simulation de la gestion : nombre de chutes par période de 24 heures.

| | Nombre de basculements | Équivalent en 24 h pendant la mise en place du basculement | 0-24 h | 24 h-48 h | 48 h-72 h | Jour moyen en période sèche |
|-------------|------------------------|--|--------|-----------|-----------|-----------------------------|
| 15 < i < 30 | 47 | 1,91 | 0,83 | 0,23 | 0,13 | 0,15 |
| i > 30 | 31 | 3,87 | 1,10 | 0,71 | 0,42 | 0,15 |

D'autres scénarios sont envisageables. Ainsi, par exemple, les tests faits sur une durée de fermeture de quarante-huit heures au lieu de vingt-quatre pour les épisodes pluvieux inférieurs à 30 millimètres donnent les résultats suivants : nombre de chutes égal à 4 pendant les premières 24 h après la fin du basculement équivalent à celui d'un jour moyen $38/5,9 = 6$. On pourrait avancer l'hypothèse que la pluie accélère légèrement la chute des blocs et que ceci se traduit par un nombre de chutes moindre après la pluie : cette hypothèse est vraisemblable pour la saison sèche, période pendant laquelle on observe le plus de pluie de faible intensité. Par ailleurs, le nombre de basculements resterait voisin de ce qu'il est actuellement.

D'autres scénarios ont été étudiés : les résultats sont présentés sur la **figure 10**. La comparaison est faite en prenant la gestion actuelle ; elle montre que l'on peut réduire le temps de basculement de 25 %, sans augmentation du risque, si l'on ne considère que l'augmentation du risque liée à la pluie.

figure 10
Comparaison de différents scénarios avec ou sans prise en compte du bruit de fond.



Actuellement, pour déterminer le point de départ du décompte des soixante-douze heures ou pour prolonger la durée du basculement, les pluies d'intensité inférieure à un millimètre pour deux heures ne sont pas prises en compte. L'étude du CETE Méditerranée montre qu'une valeur de deux millimètres conduirait à diminuer le nombre de jours de basculement de douze sur la période 1998-2002, alors que le nombre de chutes constatées pendant ces douze jours a été de un, nombre largement inférieur à l'intensité moyenne pendant les jours de non-basculement.

Par ailleurs, cette analyse montre l'intérêt d'une réduction du délai de mise en œuvre du basculement, dont l'incidence sur la sécurité est plus importante que l'effet d'une adaptation de la durée de fermeture après la pluie. Cette incidence est d'autant plus grande que l'intensité de la pluie est importante. Il serait donc opportun d'étudier les mesures permettant, soit de réduire le temps d'intervention, soit d'anticiper sur le dépassement du seuil grâce à des prévisions météorologiques.

CONCLUSION

L'amélioration de la connaissance du phénomène de production de la falaise grâce à la qualité du recueil des données effectué à partir de l'année 1998, l'analyse détaillée des chutes lors des basculements et la quantification du bruit de fond ont fourni les éléments nécessaires pour comparer différents scénarios vis-à-vis du risque résiduel. L'étude a montré qu'il était possible de diminuer notablement le nombre de jours d'exploitation de la route en mode basculé. Elle donne tous les éléments nécessaires au décideur pour choisir le nouveau système de gestion qui lui paraît le plus

approprié au regard du niveau de sécurité global (chutes et accidents de la route) et de la gêne provoquée à la fluidité du trafic.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Dominique Battista, du LRPC d'Aix-en-Provence, pour sa collaboration.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- 1 ALFONSI P., DURVILLE J.-L., Estimation d'un critère de risque minimal sur la route nationale 1 de l'île de la Réunion, *Proceedings of the twelfth european conference on soils mechanics and geotechnical engineering*, Amsterdam, 7-10 june 1999, vol. 1, pp. 309-314, mars 2000.