

Performances hydrologiques de trois toitures végétalisées différentes

■ L. ARIAS¹, R. BOURNIQUE^{1,2}, J.-C. GRIMARD², J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI¹

Mots-clés : gestion des eaux pluviales, réduction du ruissellement, rétention d'eau de pluie, toiture verte
Keywords: stormwater management, peak flow attenuation, stormwater detention, green roof

Introduction

Le processus d'urbanisation conduit à une augmentation des surfaces imperméables, entraînant de nombreux impacts liés aux événements pluvieux, notamment les inondations, l'érosion, le transfert de polluants vers les milieux aquatiques, etc. [MARSALEK, 1998]. Les toitures constituent 40 à 50 % des surfaces imperméables dans les villes les plus développées [STOVIN, 2010]. Pour réduire les volumes et pics de débits ruisselés par les toitures vers les systèmes d'assainissement, un traitement à la source est requis. Les toitures végétalisées traditionnelles montrent des performances hydrologiques satisfaisantes [MENTENS *et al.*, 2006; CZEMIEL BERNDTSSON, 2010] en plus d'autres fonctionnalités comme l'aménagement paysager, le développement des écosystèmes urbains, etc. [OBERNDORFER *et al.*, 2007].

Cependant, la rétention des volumes et la réduction des pics de ruissellement demandent à être améliorées, principalement quand les toitures végétalisées sont spécifiquement conçues pour la gestion des eaux pluviales. Par conséquent, de nouvelles configurations de toitures végétalisées ont été développées, avec l'objectif de maximiser la rétention des volumes d'eaux pluviales, de réduire les pics de ruissellement, d'accroître l'évapotranspiration et de réguler le débit de sortie des toitures. Ces nouvelles toitures sont

suivies dans le cadre du projet Gepeto (GEstion des eaux Pluviales En TOiture) financé par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Cet article présente les performances hydrologiques sur une année de trois toitures végétalisées différentes installées sur un même site expérimental.

1. Matériels et méthodes

1.1. Site expérimental

Le site expérimental est localisé à Mions, France, près de Lyon (*figure 1*) et est opérationnel depuis août 2015. Il est composé de quatre toitures expérimentales de 4,8 m² de surface chacune : 1) une toiture imperméable bitumée appelée TI, utilisée comme référence ; 2) une toiture végétalisée avec des sedums, appelée TV1, composée de 20 éléments préfabriqués (*figure 1*) qui incluent une couche de 60 mm d'épaisseur de substrat minéral (classe granulométrique 2-12 mm et capacité de stockage d'environ 24 L/m²) plantée de sedums, placée au-dessus d'une couche stockante composée de petites cavités (alvéoles) pour le stockage d'eau, remplies de billes d'argile permettant la remontée d'eau par capillarité vers les plantes ; 3) une toiture TV1 complétée par un réservoir de stockage sous-jacent en plastique, équipé d'un régulateur du débit de vidange et de mèches de subirrigation qui facilitent la remontée d'eau par capillarité, appelée TV2 ; le régulateur de débit est conçu pour limiter le débit de vidange à 4,8 L/h ; et 4) une toiture TV2 sans mèches de subirrigation, appelée TV3.

¹ Université de Lyon - INSA Lyon - DEEP, Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions - 34, avenue des Arts - 69621 Villeurbanne cedex. Courriel : jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr

² Le Prieuré Végétal I.D. - 2, place de l'Église - 41160 Moisy.

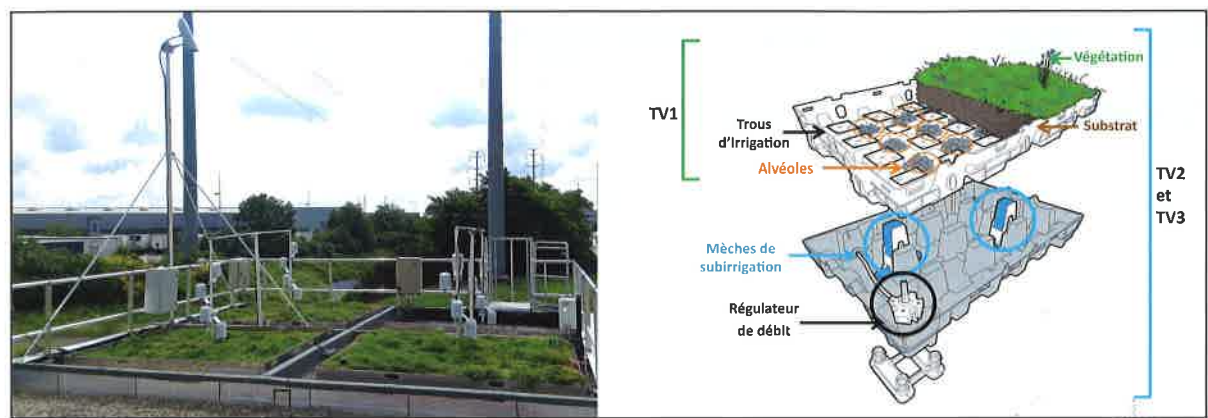


Figure 1. Site expérimental de Mions, France (gauche) et configurations de TV1 et TV2/TV3 (droite)

1.2. Suivi expérimental

Les débits de sortie de TI, TV1 et TV3 sont mesurés par un système de débitmètres à deux augets (10 mL et 1 L). Le débit de TV2 est mesuré avec le même système à deux augets complété par un débitmètre électromagnétique. Les hauteurs d'eau dans les dispositifs de stockage (alvéoles et réservoirs en plastique) sont mesurées par des limnimètres bulle à bulle (Hydro L1000, Hydrologic). La teneur en eau dans les substrats est mesurée par des sondes d'humidité (EC-5, Decagon Devices), avec deux sondes par toiture végétalisée. Les données météorologiques (température, humidité, vitesse du vent, pluviométrie et rayonnement) sont mesurées *in situ* (Précis Mécanique et Campbell Scientific) pour l'estimation de l'évapotranspiration. Les données sont enregistrées dans deux centrales d'acquisition (LOG M, KACO et CR6, Campbell Scientific) au pas de temps d'une minute. Les étalonnages des débitmètres, des limnimètres bulle à bulle, des sondes d'humidité dans le sol et du pluviomètre ont été réalisés selon des procédures spécifiques.

Le régulateur de débit breveté est conçu pour maintenir un débit de fuite faible (goutte à goutte) et constant ; flottant, il permet une conservation du niveau de l'eau qui le surmonte, donc de la pression hydrostatique qui pilote la vidange. La maintenabilité du système a été particulièrement suivie. Les régulateurs n'ont donné lieu à aucune intervention (pas de colmatage, fuite...) et fonctionnent toujours plus de 2 ans après leur installation.

2. Résultats et discussion

Quatre-vingt-dix-sept événements pluvieux ont été analysés d'août 2015 à août 2016 (12 mois), avec des caractéristiques variées présentées dans le *tableau I*. La durée des pluies analysées varie entre 0,5 et 95,6 h, avec des intensités maximales entre 0,2 et 166 mm/h. Le temps sec entre événements pluvieux a été délimité entre le dernier basculement des augets des débitmètres de sortie des toitures de l'événement pluvieux précédent et le premier basculement du pluviomètre de l'événement pluvieux suivant. Le temps sec entre événements pluvieux ainsi calculé varie entre 0,2 et 16,3 jours, ce qui influence significativement ►

	Hauteur précipitée (mm)	Durée (h)	Intensité maximale (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)	Temps sec avant le temps de pluie (jours)
Minimum	0,4	0,5	0,2	0,1	0,2
Moyenne	7,0	14,1	16,7	1,5	2,9
Maximum	63,6	95,6	166,5	14,0	16,3
Écart type	10,9	16,0	26,9	2,0	3,4

Tableau I. Caractéristiques des événements pluvieux enregistrés à Mions entre août 2015 et août 2016

► la teneur en eau dans le substrat et par conséquent les performances hydrologiques des toitures pour l'événement pluvieux suivant.

La figure 2 montre la distribution des hauteurs et des intensités moyennes précipitées pour l'ensemble des événements pluvieux.

On observe que 50 % des hauteurs précipitées sont inférieures à 2,9 mm, et que seulement 10 % environ dépassent 20 mm. La précipitation moyenne est de 7,0 mm et la précipitation cumulée sur 12 mois est de 761,8 mm sur le site expérimental de Mions, ce qui est similaire aux valeurs enregistrées par Météo France sur la station de Lyon Bron avec une précipitation moyenne de 8,8 mm et une précipitation cumulée annuelle de 703,5 mm. On observe également que la moitié des intensités moyennes sont inférieures à 0,66 mm/h.

Choisi à titre d'exemple, l'événement pluvieux du 30 avril 2016 permet une analyse comparée du fonctionnement et des performances des toitures végétalisées

TV1, TV2 et TV3 (figure 3). La hauteur totale précipitée de cet événement est de 18 mm sur une durée de 46 h. L'intensité maximale atteint 12,7 mm/h et la durée de temps sec antérieure est de 3,4 jours. Au début de l'événement pluvieux (figure 3a), la toiture imperméable de référence TI ruisselle immédiatement avec un débit de l'ordre de 0,2 L/min. La toiture végétalisée traditionnelle TV1 intercepte entièrement le début de l'événement pluvieux jusqu'au moment où la couche de substrat devient saturée, ce qui intervient environ 9 h après le début de la pluie. La hauteur de pluie cumulée est alors de 9,4 mm. S'ensuit le débordement des alvéoles, à la suite de quoi le débit de sortie de TV1 suit la même allure que celui de la toiture non végétalisée TI. Par ailleurs, les débits de sortie de TV2 et TV3 sont notablement plus faibles et retardés que pour TV1.

Pour cet événement, les trois toitures végétalisées montrent de bonnes performances de rétention. En particulier, les configurations TV2 et TV3, qui

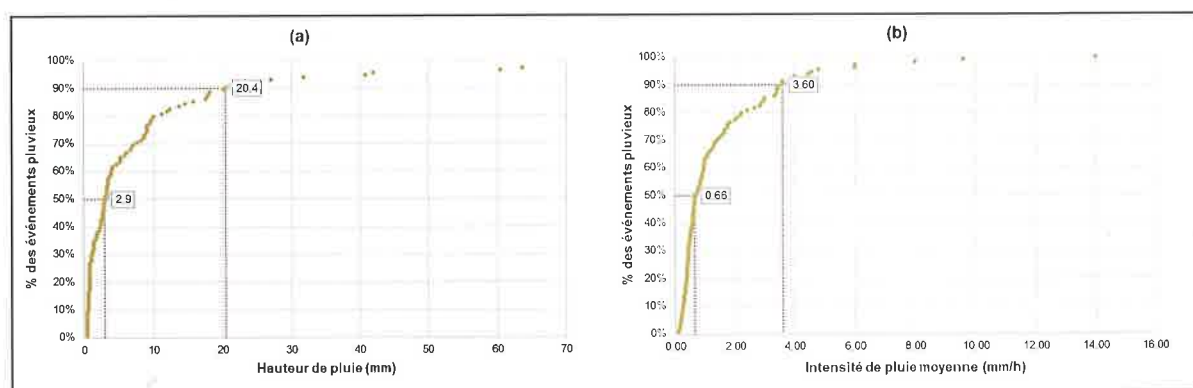


Figure 2. Distribution des hauteurs (a) et des intensités moyennes (b) des événements pluvieux enregistrés à Mions entre août 2015 et août 2016

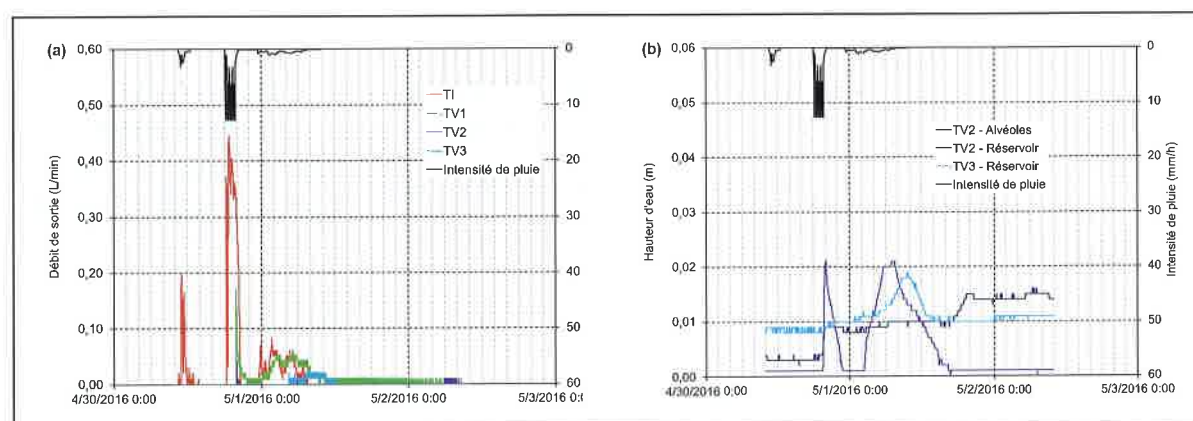


Figure 3. Pluviométrie et débits de sortie pour les configurations TV1, TV2, TV3 et TI (a) et hauteurs d'eau dans les alvéoles et les réservoirs de stockage de TV2 et TV3 (b) pour l'événement pluvieux du 30 avril 2016 sur le site expérimental de Mions (France)

comprennent un réservoir de stockage et un régulateur de débit identiques, interceptent respectivement 99,6 % et 95,1 % du volume de pluie précipité. De son côté, la toiture végétalisée classique TV1 présente un bon taux d'interception de 70,2%, mais montre aussi sa limite : une fois le substrat saturé, seuls 38 % des 8,6 mm de pluie restants sont retenus dans les alvéoles.

L'atténuation du pic de débit est conforme à la moyenne pour TV2 et TV3 (tableau II), avec une atténuation de 96 % et 98 % respectivement, cependant pour TV1 une atténuation de 83 % est observée, légèrement au-dessous de la moyenne.

L'effet des mèches de subirrigation peut être mis en évidence en observant la hauteur d'eau dans les réservoirs de stockage au début de l'événement (figure 3b) : la réutilisation par les plantes (évapotrans-

piration), pendant les jours précédant l'événement, de l'eau de pluie stockée dans le réservoir permet à TV2 de compter moins d'eau au début de l'événement (4 mm contre 9 mm pour TV3), ce qui lui permet d'avoir une capacité d'interception initiale plus importante.

À court terme après un événement pluvieux, la hauteur dans le réservoir de TV2 peut parfois être supérieure à celle du réservoir de TV3 (figure 3b) : cela est dû à une différence de pente constatée (mais non intentionnelle) après la mise en place des toitures : TV2 a une pente supérieure à TV3, ce qui conduit plus rapidement l'eau vers le réservoir, donc vers le régulateur de débit et l'exutoire où sont réalisées les mesures.

Comparer l'évolution de la hauteur d'eau dans les réservoirs de stockage de TV2 et TV3 pendant une période plus longue permet de mieux mettre en évidence le rôle des mèches de subirrigation. La figure 4 présente les données mesurées entre le 22 avril et le 21 mai 2016. Le niveau d'eau dans le réservoir de TV2 décroît plus rapidement que celui de TV3 durant les périodes de temps sec qui suivent les événements pluvieux en raison de la remontée de l'eau du bac de stockage pour l'évapotranspiration de la végétation. Le niveau d'eau dans le réservoir de TV3 est quant à lui assez stable entre deux événements successifs. Les mèches de subirrigation permettent donc bien une remontée de l'eau vers la végétation et une évapotranspiration accrue.

Les performances hydrologiques pour l'ensemble des événements pluvieux observés sont présentées dans le tableau II. ►

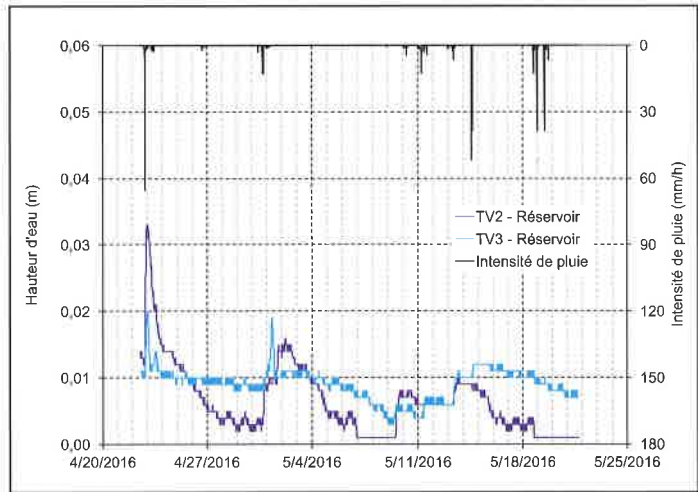


Figure 4. Pluviométrie et hauteurs d'eau dans les réservoirs de stockage de TV2 et TV3 entre le 22 avril 2016 et le 21 mai 2016 sur le site expérimental de Mions (France)

	Rétention (%)				Amortissement du pic de ruissellement (%)				Stockage d'eau maximum (mm)		
	TI	TV1	TV2	TV3	TI	TV1	TV2	TV3	TV2 Alvéole	TV2 Réservoir	TV3 Réservoir
Minimum	0	19	33	72	0	39	76	91	0	0	0
Moyenne	34	87	95	99	43	92	97	99,6	3	3,8	1,7
Maximum	100	100	100	100	100	100	100	100	18,1	39,9	29,1
Écart type	27	24	13	5	23	14	4	2	5,4	8,7	5,1
(Nombre de données)	(94)	(96)	(96)	(37)*	(81)	(97)	(96)	(37)*	(74)	(74)	(37)*

*Des aléas expérimentaux ne permettent pas d'avoir des données fiables pour TV3 d'août 2015 à avril 2016.
Tableau II. Performances hydrologiques des toitures pour l'ensemble des événements pluvieux d'août 2015 à août 2016

► Globalement, les toitures végétalisées montrent des performances hydrologiques supérieures à TI. L'influence du réservoir de stockage est observée grâce aux meilleures performances moyennes de rétention par TV2 (95 %) et TV3 (99 %), contre 87 % pour TV1. La rétention minimale est supérieure pour TV2 (33 %) et TV3 (72 %) comparativement à TV1 (19 %) grâce à la présence du réservoir de stockage additionnel. L'ensemble du réservoir de stockage et du régulateur de débit améliore l'amortissement de pic de ruissellement de 5 à 7 %, selon les résultats moyens de TV2 (97 %) et TV3 (99,6 %) en comparaison avec TV1 (92 %), mais l'amortissement minimum constaté est de 76 % pour TV2 contre seulement 39 % pour TV1. La subirrigation contribue à la vidange du réservoir de stockage de TV2 et, par conséquent, augmente sa capacité de rétention, obtenant une moyenne de stockage maximal de 3,8 mm contre 1,7 mm pour TV3. Cette différence se retrouve dans les valeurs maximales, respectivement égales à 39,9 mm pour TV2 et 29,1 mm seulement pour TV3.

Bibliographie

CZEMIEL BERNDTSSON J. (2010) : « Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review ». *Ecological Engineering* ; 36(4) : 351-60.

MARSALEK J. (1998) : « Challenges in urban drainage ». In : Marsalek J., Maksimovic C., Zeman E., Price R., eds. *Hydroinformatics tools for planning, design, operation and rehabilitation of sewer systems*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, vol. 44. p. 1-23. ISBN: 978-90-481-5036-6.

MENTENS J., RAES D., HERMY M. (2006) : « Green roofs

Conclusions

Les résultats obtenus sur le site expérimental de Mions avec trois toitures végétalisées différentes montrent que si la toiture végétalisée classique TV1 présente des performances hydrologiques intéressantes pour la plupart des événements pluvieux, sa capacité de rétention est fortement altérée lors des pluies importantes ou successives. De même, l'amortissement du pic de débit par TV1 dépend de la saturation en eau du substrat. L'ajout d'un réservoir de stockage, d'un régulateur de débit ainsi que de mèches de subirrigation sur les toitures TV2 et TV3 permet d'obtenir de meilleures performances et une bonne gestion des eaux pluviales même lors des événements critiques ou successifs. Une phase de modélisation des transferts d'eau est en cours avec les résultats obtenus lors de la phase expérimentale.

Remerciements

Cette étude fait partie du projet Gepeto financé par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse et la société Le Prieuré. Les auteurs remercient la direction de l'eau de Lyon Métropole et la société Sogaris pour la mise à disposition du site expérimental de Mions.

as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? » *Landscape and Urban Planning* ; 77(3) : 217-26.

OBERNDORFER E., LUNDHOLM J., BASS B., COFFMAN R.R., DOSHI H., DUNNETT N., et al. (2007) : « Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services ». *Bioscience* ; 57(10) : 823-33.

STOVIN V. (2010) : « The potential of green roofs to manage Urban Stormwater ». *Water and Environment Journal* ; 24(3) : 192-9.

Résumé

L. ARIAS, R. BOURNIQUE, J.-C. GRIMARD, J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI

Performances hydrologiques de trois toitures végétalisées différentes

Les toitures végétalisées comprennent un grand nombre de domaines d'application, notamment le développement des écosystèmes urbains et la réduction des volumes et des pics de ruissellement par temps de pluie. Les toitures végétalisées traditionnelles présentent de bonnes performances hydrologiques. Cependant, de nouvelles configurations ont été développées avec l'objectif de maximiser la rétention des volumes d'eau de pluie et l'évapotranspiration de la végétation, et de réduire davantage les pics de ruissellement. Les performances hydrologiques de trois toitures végétalisées expérimentales installées sur un même site sont présentées : 1) une toiture végétalisée traditionnelle

avec des alvéoles stockantes sous la couche de substrat, appelée TV1 ; 2) une configuration TV1 complétée d'un réservoir de stockage sous-jacent, d'un régulateur de débit de sortie et de mèches de subirrigation, appelée TV2 ; et 3) une configuration TV2 sans mèches de subirrigation, appelée TV3. Les résultats pour 91 événements pluvieux sont présentés, avec des performances moyennes de rétention des volumes de pluie plus élevées pour TV2 (95 %) et TV3 (99 %) que pour TV1 (87 %). Ainsi que pour la réduction des pics de ruissellement, avec des performances moyennes de 97 % et 99 % pour TV2 et TV3 respectivement, contre 92 % pour TV1.

Abstract

L. ARIAS, R. BOURNIQUE, J.-C. GRIMARD, J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI

Hydrological performance of three different vegetated roofs

Green roofs have a wide range of applications, including the development of urban ecosystems and reducing volumes and peaks of stormwater. Traditional green roofs have good hydrological performances. However, new configurations have been developed with the aim of maximizing both the retention of rainwater and the evapotranspiration of the vegetation, and further reducing runoff peaks. The hydrological performances of three vegetated experimental roofs installed on the same site are presented: 1) a traditional vegetated roof with storage

cells underneath the substrate layer, called TV1; 2) a TV1 configuration supplemented with an underlying storage tank, an outflow regulator and sub-irrigation wicks, called TV2; and 3) a TV2 configuration without sub-irrigation wicks, called TV3. The results for ninety-one rainfall events are presented, with higher mean rainfall retention rates for TV2 (95%) and TV3 (99%) than for TV1 (87%). As well as for the reduction of runoff peaks, with average performances of 97% and 99% for TV2 and TV3 respectively, compared with 92% for TV1.



MESURES, ÉTUDES, ANALYSES ENVIRONNEMENTALES

Eau, air, sols, déchets, amiante, bruit... Vos questions sur les impacts environnementaux nécessitent souvent des réponses prenant en compte la globalité des éléments.

SGS Multilab dispose de la plus large palette d'accréditations et d'agrément du secteur. Nos prestations couvrent l'ensemble de vos besoins d'évaluation environnementale, du prélèvement à l'analyse, partout en France. Nos connaissances et reconnaissances sont votre passeport confiance.

SGS vous conseille également pour vos audits SRR, essais de garantie sur station et campagnes RSDE 2018.

CONTACT : t. 01 69 36 72 72 • f. 01 69 36 51 88 • fc@environnement.levy@sgs.com • www.sgsgroup.fr

SGS EST LE LEADER MONDIAL DE L'INSPECTION, DU CONTRÔLE, DE L'ANALYSE ET DE LA CERTIFICATION

WHEN YOU NEED TO BE SURE

SGS