



HAL
open science

Adaptation de l'agriculture irriguée au changement climatique (aicha) : une modélisation trans-disciplinaire d'un bassin-versant en Inde du sud

Laurent Ruiz, Muddhu Sekhar, Alban Thomas, Shrinivas Badiger, Sundaram Buvaneshwari, Sreelash Krishnan Kutty, Jacques-Eric Bergez, Samuel Buis, Delphine Burger-Leenhardt, Samuel Corgne, et al.

► To cite this version:

Laurent Ruiz, Muddhu Sekhar, Alban Thomas, Shrinivas Badiger, Sundaram Buvaneshwari, et al.. Adaptation de l'agriculture irriguée au changement climatique (aicha) : une modélisation trans-disciplinaire d'un bassin-versant en Inde du sud. 10. Colloque Modèle de culture STICS, Mar 2015, Rennes, France. , 103 p., 2015, Xe séminaire des utilisateurs et concepteurs du modèle STICS. Ier séminaire du réseau scientifique STICS. hal-01601473

HAL Id: hal-01601473

<https://hal.science/hal-01601473>

Submitted on 3 Jun 2020

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.



X^e Colloque
Modèle de culture
STICS

24-26
mars
2015

stics
RENNES

X^e séminaire des utilisateurs et concepteurs du modèle STICS

1^{er} séminaire du réseau scientifique STICS



24-26 mars 2015

AGROCAMPUS OUEST, 65 rue de St-Brieuc, Rennes



ORGANISATION

Pour Rennes :

Virginie Parnaudeau, Karine Derrien et Maryvonne Pertué (UMR SAS)

Site web : Thierry Trochet (UMR SAS)

Logistique site AGROCAMPUS OUEST : Anne Bourdeau et Stéphane Crespel (Agrocampus Ouest)

Conception graphique : Sylvaine Bitteur et Eric Beaumont (INRA Rennes)

Pour l'Equipe Projet STICS :

Nicolas Beaudoin ; Dominique Ripoche

COMITE SCIENTIFIQUE

Nicolas Beaudoin ; Dominique Ripoche ; Virginie Parnaudeau

Patrick Bertuzzi ; Samuel Buis ; Eric Casellas ; Julie Constantin ; Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri ; Benjamin Dumont ; Ophélie Fovet, Eric Justes ; Hayo van der Werf ; Marie Launay ; Christine Le Bas ; Gaetan Louarn ; Françoise Ruget

INTERVENANTS INVITES

Margarita Ruiz-Ramos : chercheuse à l'Ecole Technique Supérieur des Ingénieurs Agronomes de l'Université Polytechnique de Madrid, dans l'équipe AgSystems (Systèmes des cultures).

Spécialiste de la modélisation de cultures, qui a réalisé de nombreuses études sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture en France.

Pierre Cellier : directeur de recherche à l'INRA, UMR ECOSYS à Grignon, Chef de Département Adjoint « Environnement et Agronomie ».

Spécialiste des échanges de masse et d'énergie entre les couverts agricoles et l'atmosphère et des émissions et dépôts de polluants (NH₃, NO_x, ozone, pesticides) et de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, ozone).

SOUTIENS FINANCIERS ET LOGISTIQUES

INRA – Département Environnement et Agronomie ; Agrocampus Ouest ; Rennes Métropole

INRA - Centre de Rennes ; INRA – UMR SAS

PROGRAMME

Mardi 24 mars 2015

8h00-9h30 **Accueil café**

Session 1 : Matinée introductive

Animateur : Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri

9h30-11h00 *Equipe projet STICS (EPS) : Travaux et gouvernance de l'Equipe Projet STICS*

11h00-11h45 *Cellier Pierre : Enjeux du réseau STICS pour les départements EA et l'INRA*

11h45-12h00 **Mini-pause**

12h00-13h00 *Keynote par Margarita Ruiz Ramos :
Les modèles de culture face au changement climatique : les enjeux des projets
nationaux, européens et internationaux*

13h00-13h15 *Informations pratiques*

13h30-14h30 **Repas**

14h45-16h15 **Session 2 : Projets internationaux mobilisant STICS**

Animateur : Eric Justes

*Patrick Bertuzzi et al. : STICS et exercices internationaux d'inter-comparaison de
modèles de culture. (20 + 5 min)*

*JE Bergez, Hélène Raynal, Patrick Durand, Laurent Ruiz et al. : AICHA: un projet
franco-indien pour l'analyse de l'impact du changement climatique sur
l'agriculture irriguée en Inde du sud. (25 + 5 minutes)*

*Fernando Macena da Silva, François Affholder, Marc Corbeels : Les impacts du
changement climatique sur la production de maïs dans le Cerrado du Brésil.*

*Françoise Ruget, Dominique Ripoche, Jean-Louis Durand : Comprendre les
différences entre des sorties de modèles plutôt que les moyennner ?*

16h15-16h45 **Pause**

16h45-17h45 **Session 3 : Couplage et approches intégrées mobilisant STICS**

Animateur : Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri

*Julie Caubel, Sophie Wieruszkeski, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Nathalie de
Noblet-Ducoudré : Recherche d'indicateurs de fonctionnement des grandes
cultures à partir du modèle global ORCHIDEE : cas du rendement*

*Sabine-Karen Yemadje, Julien Moeys, Eric Justes, Enrique Barriuso, Marjorie
Ubertosi, Nicolas Munier-Jolain, Laure Mamy : Forçage du modèle de simulation
du devenir des pesticides MACRO avec le modèle de culture STICS pour évaluer
les flux de pesticides dans les systèmes de culture innovants*

*Pierre Humblot, Pierre-Alain Jayet, Elvire Petel, Athanasios Petsakos : L'eau et
l'azote comme intrants : apports d'un modèle de culture à l'analyse économique.*

18h30 **Visite guidée de Rennes (Rendez-vous : Place du Parlement)**

20h30 **Repas en ville en crêperie (L'Epi de Blé, place de la gare)**

Mercredi 25 mars 2015

8h30-10h30 **Session 4 : Nouveaux formalismes et évaluation de STICS**

Animatrice : Françoise Ruget

L. Strullu, F. Ferchaud, N. Beaudoin, N. Yates, I.G. de Cortàzar Aauri, I. Shield et B. Mary : -: Amélioration et validation multi-sites d'une version de recherche du modèle STICS pour simuler sur le long terme une culture pérenne : Miscanthus × giganteus

Guillaume Jégo, Martin Chantigny, Elizabeth Pattey, Gilles Bélanger, Philippe Rochette, Anne Vanasse, Claudia Goyer : Amélioration d'un modèle de couvert de neige et simulations multi-annuelles avec STICS dans les climats nordiques

Laure Beff, Yvon Lambert, Nicolas Beaudoin, Bruno Mary et Thierry Morvan: Utilisation du modèle STICS pour quantifier la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique du sol sur le réseau régional "Mh"

Wilfried Queyrel, Florence Habets, Hélène Blanchoud, Marie Launay, Dominique Ripoche : Simulation du devenir des pesticides dans les sols à l'aide du module Pestic : applications et futurs développements

S. Zaka, S. Buis, F. Ruget, J.-L. Durand, G. Louarn : Analyse de sensibilité des fonctions de réponse à la température dans STICS-Prairie

Magali Willaume, Julie Constantin, Olivier Therond : AqYield peut-il rivaliser avec STICS pour simuler la dynamique hydrique et le rendement de 3 cultures de printemps sous contraintes hydriques ?

10h30-11h **Pause**

11h-13h15 **Session 5: Usage de STICS à des échelles spatiales « larges »**

Animateur : Gaëtan Louarn

Elizabeth Pattey, Guillaume Jégo, S. Morteza Mesbah, Jianguo Liu, Isabelle Duchesne : Impact de la résolution spatiale des propriétés de sol et des données climatiques sur les prédictions régionales de rendement du maïs avec le modèle STICS (logiciel OptimiSTICS)

Christine Le Bas, Yves Coquet, Marion Bardy, Robert Faivre, Martine Guérif, Florence Habets, Samuel Buis, Isabelle Cousin : Etude méthodologique de l'impact des incertitudes liées à l'estimation spatialisée des paramètres sols du modèle Stics à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000. :

Enguerrand Burel, Rémy Fieuzal, Frédéric Baup, Nathalie Jarosz-Pellé, Vincent Bustillo : Perspectives d'amélioration du modèle STICS par couplage pour la spatialisation du fonctionnement des agrosystèmes en conditions hydriques limitantes

Sylvain Ferrant, Simon Gascoin, Patrick Durand, Vincent Bustillo : Perspectives de la télédétection dans la modélisation agro-hydrologique spatialisée : l'exemple de la pollution agricole dans le sud-ouest de la France :

Beaudoin N., Mary B., Gallois N., Le Bas C., Puech T., Schott C., Viennot P. : Expertise multicritère de la spatialisation de STICS à l'échelle macro-régionale : Application à la modélisation des flux d'eau et d'azote dans le bassin de la Seine

13h30-14h30 **Repas**

14h45-16h15 **Session Posters**

16h15-16h45 **Pause**

16h45-18h30 **Tables rondes en parallèle**

- Quels besoins de prise en compte de nouveaux processus ou de révision de formalismes existants ? (avec introduction sur le projet scientifique).

Animé par Gaëtan Louarn et Marie Launay

- Test, évaluation et domaine de définition : comment augmenter la confiance des utilisateurs dans le modèle (communication de performances sur quels systèmes, plantes, processus (CC), configuration pédoclimatique, mise à disposition d'outil).

Animé par Samuel Buis et Eric Justes

- Ergonomie, documentation, outils : comment faciliter l'utilisation de STICS ?

Animé par Dominique Ripoche et Christine Le Bas

- Modulariser STICS : pour faire quoi, quelles attentes vis à vis de la modularisation.

Animé par Eric Casellas et Nicolas Beaudoin

20h **Repas en ville (La Taverne) avec le groupe de musique celtique Pao Bran**

Jeudi 26 mars 2015

9h-10h30 **Session 6 : Systèmes de culture innovants et paramétrages associés**

Animatrice : Marie Launay

Françoise Ruget, Kamran Irfan, Samuel Buis : Aptitudes de STICS calibré à estimer le rendement du riz en Camargue lorsqu'il est calibré sur des données en parcelles agricoles

Daniel Plaza-Bonilla et Eric Justes : Simulation avec le modèle STICS de 6 systèmes de culture à bas intrants incluant des légumineuses à graines et des cultures intermédiaires

Cecilia M. Armas-Herrera, Nicolas Beaudoin, Silvina B. Restovich, Adrian E. Andriulo, François Affholder, Alexandra Maltas, Jørgen E. Olesen, Behzad Sharif, François Laurent, Jean-Pierre Coha, Bruno Mary : Modélisation avec STICS des effets de non travail versus travail du sol en systèmes de culture sous des conditions pédoclimatiques contrastées

Hélène Tribouillois et Eric Justes : Simulation avec le modèle STICS des services écosystémiques de gestion de l'azote produits par des cultures intermédiaires bispécifiques

10h30-11h **Pause**

11h-12h15 **Restitution des tables rondes**
Assemblée générale

12h15-13h15 **Conclusion**

13h30-14h30 **Repas assis ou panier-repas**

14h30 **Clôture du séminaire**

TABLE DES MATIERES

Organisation	2
Comité scientifique.....	2
Intervenants invités.....	2
Soutiens financiers et logistiques.....	2
Programme.....	3
SESSION 1 – Communication orale.....	9
Système de test et d'évaluation en routine du modèle STICS	10
SESSION 1 - Posters	12
Refactoring du code de STICS.....	13
Mise en œuvre de simulations grande échelle de STICS sur la plate-forme RECORD. Application aux projets Agmip (pilote C3MP) et MACSUR (scaling pilot)	15
SESSION 2 – Communications orales.....	17
STICS et exercices internationaux d'inter-comparaison de modèles de culture.....	18
Adaptation de l'agriculture Irriguée au CHAngement climatique (AICHA) : une modélisation trans-disciplinaire d'un bassin-versant en Inde du Sud	22
AICHA : Un modèle intégré pour l'étude de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines d'un petit bassin versant Indien	24
Les impacts du changement climatique sur la production de maïs dans le Cerrado du Brésil.....	26
Comprendre les différences entre des sorties de modèles plutôt que les moyennner ?.....	28
SESSION 3 – Communications orales.....	31
Recherche d'indicateurs de fonctionnement des grandes cultures à partir du modèle global ORCHIDEE : cas du rendement.....	32
Forçage du modèle de simulation du devenir des pesticides MACRO avec le modèle de culture STICS pour évaluer les flux de pesticides dans les systèmes de culture innovants.....	34
L'eau et l'azote comme intrants : apports d'un modèle de culture à l'analyse économique.....	36
SESSION 3 - Posters	38
Etude des conséquences environnementales de la substitution des engrais minéraux par l'épandage de Produits Résiduaux Organiques (PROs) avec la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)	39
Couplage de STICS avec un modèle d'architecture racinaire, ARCHISIMPLE	41
SESSION 4 – Communications orales.....	43
Amélioration et validation multi-sites d'une version de recherche du modèle STICS pour simuler sur le long terme une culture pérenne : Miscanthus × giganteus	44
Amélioration d'un modèle de couvert de neige et simulations multi-annuelles avec STICS dans les climats nordiques.....	46
Utilisation du modèle STICS pour quantifier la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique du sol sur le réseau régional "Mh"	48
Simulation du devenir des pesticides dans les sols à l'aide du module Pestic : applications et futurs développements.....	50

Analyse de sensibilité des fonctions de réponse à la température dans STICS-Prairie.....	52
AqYield peut-il rivaliser avec STICS pour simuler la dynamique hydrique et le rendement de 3 cultures de printemps sous contraintes hydriques ?	54
SESSION 4 - Posters	57
Création de IDE-STICS (base de données intercontinentale pour l'évaluation de STICS)	58
SESSION 5 – Communications orales.....	60
Impact de la résolution spatiale des propriétés de sol et des données climatiques sur les prédictions régionales de rendement du maïs avec le modèle STICS (logiciel OptimiSTICS)	61
Etude méthodologique de l'impact des incertitudes liées à l'estimation spatialisée des paramètres sols du modèle Stics à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000.....	63
Perspectives d'amélioration du modèle STICS par couplage pour la spatialisation du fonctionnement des agrosystèmes en conditions hydriques limitantes	65
Perspectives de la télédétection dans la modélisation agro-hydrologique spatialisée : l'exemple de la pollution agricole dans le sud-ouest de la France	67
Expertise multicritère de la spatialisation de STICS à l'échelle macro-régionale : Application à la modélisation des flux d'eau et d'azote dans le bassin de la Seine.....	69
SESSION 5 - Posters	71
Modélisation avec STICS de l'impact de la gestion des résidus de culture sur l'évolution de la fertilité du sol et du potentiel de rendement d'une culture de blé	72
Cycle de l'azote en milieu tropical semi-aride sous culture intensive: le bassin versant de la Berambadi	74
Nitrogen cycle in a tropical semi-arid watershed under intensive agriculture: The Berambadi case	74
STICS ET LA PRODUCTION DE REFERENCES LOCALES : EXEMPLE DE LA MODELISATION DU DEVELOPPEMENT DU BLE DANS UNE REGION NATURELLE DE CHARENTE-MARITIME	76
SESSION 6 – Communications orales.....	79
Aptitudes de STICS calibré à estimer le rendement du riz en Camargue lorsqu'il est calibré sur des données en parcelles agricoles.....	80
Simulation avec le modèle STICS de 6 systèmes de culture à bas intrants incluant des légumineuses à graines et des cultures intermédiaires	83
Modélisation avec STICS des effets de non travail versus travail du sol en systèmes de culture sous des conditions pédoclimatiques contrastées.....	85
Simulation avec le modèle STICS des services écosystémiques de gestion de l'azote produits par des cultures intermédiaires bispécifiques	87
SESSION 6 - Posters	89
Intégration de données simulées par STICS dans un indicateur agro-environnemental de couverture du sol	90
Les pertes de C et N organique du sol sont réduites grâce à l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations avec légumineuses : simulations avec le modèle STICS	92
Paramétrage du modèle de culture STICS pour simuler la croissance des prairies de <i>Brachiaria brizantha</i> cv. BRS Piatã en conditions du Cerrado brésilien	94
Utilisation de STICS pour l'analyse de services écosystémiques multiples en verger de pommiers	96

Quantification des niveaux de stress abiotiques avec le modèle de culture STICS : une première étape dans l'évaluation de la robustesse des systèmes agricoles..... 98

ADAPTATION DE L'AGRICULTURE IRRIGUÉE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (AICHA) : UNE MODELISATION TRANS-DISCIPLINAIRE D'UN BASSIN-VERSANT EN INDE DU SUD

ADAPTATION OF IRRIGATED AGRICULTURE TO CLIMATE CHANGE (AICHA) : TRANS-DISCIPLINARY MODELLING OF A WATERSHED IN SOUTH INDIA

Laurent RUIZ^{1,2,3}, Muddhu SEKHAR^{3,4}, Alban THOMAS⁵, Shrinivas BADIGER⁶, S. BUVANESHWARI³, K. SREELASH^{3,8}, J-E. BERGEZ⁷, Samuel BUIS⁸, Delphine LEENHARDT⁷, Samuel CORGNE⁹, Jean RIOTTE^{3,10}, Hélène RAYNAL¹¹, S. BANDHYOPADHYA¹² et Patrick DURAND^{1,2}

¹INRA, UMR SAS, Rennes, France ; ²Agrocampus Ouest, UMR SAS, Rennes, France ; ³Indo-French Cell for Water Sciences, IRD-Indian Institute of Science, Bangalore, India ; ⁴Indian Institute of Science, Department of Civil Engineering, Bangalore, India ; ⁵INRA, LERNA, Toulouse School of Economics, Toulouse, France ; ⁶ATREE, Ashoka Trust for Research in Ecology and the Environment, Bangalore, India ; ⁷INRA, UMR AGIR, Toulouse, France ; ⁸INRA, UMR EMMAH, Avignon, France ; ⁹LETG, COSTEL, Univ. Rennes 2, Rennes, France ; ¹⁰IRD, GET, Toulouse, France ; ¹¹INRA, UMIAT, Toulouse, France ; ¹²ISRO, Head quarters, Bangalore, India

Contact : ruiz@rennes.inra.fr

Mots clés : ressource en eau, durabilité, STICS, Record, Ambhas, économie, décision,

Keywords : water resource, sustainability, STICS, Record, Ambhas, economy, decision

Introduction

Dans le contexte du changement climatique et d'une agriculture dépendant de plus en plus de l'irrigation à partir d'eaux souterraines, il est crucial de développer des méthodes fiables pour l'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles actuels et alternatifs. La prise en compte dans la gestion de la ressource en eau des interactions et des rétroactions entre les processus biophysiques déterminant le mouvement de l'eau et le comportement humain, dans un contexte socio-économique donné, est une nécessité maintenant reconnue par la communauté scientifique, comme en témoigne la recommandation récente pour le développement d'une nouvelle science, la « socio-hydrologie », pour étudier la « co-évolution des systèmes couplés eau-homme » (Sivapalan et al., 2011). Récemment, l'AIHS a proposé les « changements dans l'hydrologie et la société » comme thème principal de recherches pour la décennie 2013-2022 (Montanari et al, 2013). Une grande variété de modèles a été développée pour simuler de futurs scénarios de changement d'utilisation du territoire, changement de climat ou évaluation ex-ante des politiques de gestion. Ces modèles ne prennent généralement pas en compte les rétroactions de la raréfaction des ressources en eau sur les stratégies des agriculteurs, et tendent à négliger les interactions biophysiques et socio-économiques se produisant dans l'espace et le temps dans les bassins versants (Barthel et al, 2012). Nous présentons ici le projet Indo-Français « AICHA » du CEFIPRA (Adaptation de l'agriculture irriguée au changement climatique, 2013-2016) basé sur un observatoire environnemental à long terme installé en Inde du sud. Nous décrivons l'approche transdisciplinaire qui est développée pour analyser les facteurs agro-hydrologiques et socio-économiques de la durabilité des ressources en eau souterraine et de l'adaptation des agriculteurs, en utilisant un modèle intégré.

Site d'étude et problématique

Le bassin versant de Berambadi (84 km²) appartient au bassin de la South Gundal, 816 km², lui même inclus dans celui la Kabini (7000 km², SO Karnataka). Le climat régional est dominé par un régime de mousson responsable d'un gradient fort de précipitation, avec des oscillations décennales et une forte variabilité

inter-annuelle produisant des sécheresses récurrentes (Sekhar et al., 2011). Le site a été équipé comme observatoire de recherches depuis 2002 par la cellule Indo-Française de recherches en Science de l'eau (LMI IFCWS - IISc/IRD) à Bangalore. Il est identifié comme observatoire recherches environnementales (ORE) (<http://bvet.omp.obs-mip.fr>). Des enquêtes socio-économiques ont été effectués dans le cadre du projet d'AICHA (plus de détails sur <http://ambhas.com/>). Les niveaux de nappe présentent une allure non classique en hydrogéologie, avec les parties basses du relief ayant des niveaux plus profonds que les zones topographiquement plus élevées.

Cela résulte du pompage intensif des eaux souterraines dans les villages de la vallée, qui a commencé au début des années 90. Le déclin des niveaux de nappe a provoqué la déconnection entre les eaux souterraines et le lit de fleuve, et les cours d'eau principaux sont devenus intermittents. Des puits ont été récemment forés dans les secteurs amont et l'irrigation augmente. Notre analyse suggère que ces évolutions contrastées sont étroitement liées à la distribution spatiale des types de sol et à la disponibilité des eaux souterraines, mais aussi à l'accès au marché et à l'éducation des populations.

Modélisation Transdisciplinaire

La structure de modélisation combine des modules hydrologique, agronomique (STICS), économique et un module de décision des exploitants, simulant leurs choix stratégiques à différentes échelles de temps au moyen de règles de décision, qui permettent la représentation de l'adaptation des agriculteurs à un environnement en cours d'évolution. Il est développé sur la plateforme RECORD (Bergez et al, 2013, 2014). Les hypothèses sont que:

- le système est régi par les interactions et les rétroactions entre la croissance des plantes, la disponibilité de ressource d'eau et les composants socio-économiques ;
- Le système est gouverné par les variations spatiales de tous ses composants et les interactions et les rétroactions spatiales jouent un rôle important, particulièrement du fait que l'aquifère en milieu cristallin présente de faibles capacités d'emménagement et des mécanismes spatiaux complexes de recharge.

Un des défis lié à l'emploi de tels modèles pour tester des scénarios spatiaux est le besoin de connaissance précise, par exemple pour les paramètres de sol et de plante (Launay et Guérif, 2005) qui ne sont que peu disponibles en conditions tropicales. Cela a stimulé l'élaboration de méthodologies innovantes, comme par exemple une méthode d'évaluation des paramètres de sol utilisant la télédétection et l'inversion du modèle de culture STICS (Sreelash et al., 2012 ; 2013).

Références bibliographiques

- Barthel, R., et al., (2012) *Water Resource Management* 26:1929–1951
- Bergez, J.-E., et al., (2013) *Environmental Modelling & Software*, 39, 39-49.
- Bergez, J. E., et al., (2014) *Environmental Modelling & Software*, 62, 370-384.
- Launay, M. and Guérif, M., (2005). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111, 321–339
- Montanari, A., et al., (2013) *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256-1275.
- Sekhar, M., et al., (2011) In: Findkakis, A.N., Sato, K. (Eds.), *Groundwater Management Practices: IAHR Monograph*.
- Sreelash, K., et al., (2012) *Journal of Hydrology* 456-457, 57-67.
- Sreelash, K., et al., (2013). *Journal of the Indian Institute of Science* 93(2), 189-207.
- Sivapalan, M., et al., (2012) *Hydrological Processes*, 26, 1270–1276.