

ERF²⁰²⁰ 26TH Annual Conference

Les Technologies de L'Information et de Communication et le Développement Durable: Enjeux et Pratiques Dans les Pays en Développement

Mohamed Bouhari



Les technologies de l'information et de communication et le développement durable: enjeux et pratiques dans les pays en développement

Mohamed Bouhari : Professeur en Economie à la Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Tunis, Université de Tunis El Manar mohabouhtn@yahoo.com

Résumé

Cet article cherche à identifier la place qu'occupent les technologies de l'information et de communication (TIC) dans les différentes dimensions de développement durable, en particulier dans les pays en développement. Tout en reconnaissant la difficulté à mesurer le poids économique, social et environnemental des TIC dans le développement, un cadre conceptuel d'analyse basé sur une approche par les capacités a été proposé pour étudier la capacité des TIC à intégrer les dimensions économiques, sociales et environnementales.

Un modèle Vectoriel Auto Régressif (VAR) en Panel a été utilisé afin de tenir compte de l'interdépendance entre les TIC et les usages qui y sont liés et le développement durable. Pour cela, nous avons considéré 19 pays en développement (d'Afrique et Arabe) pendant la période 2000-2017. Nos résultats montrent que l'ampleur de développement des TIC demeure imposante quoiqu'il soit inégal entre les pays à divers stades de développement. Ainsi l'analyse de la causalité de Granger révèle l'existence d'une relation bidirectionnelle pour les pays affichant un niveau élevé de développement durable.

Au terme de cette étude, il apparaît que pour certains pays, le développement durable passe par l'amélioration de l'accès aux ressources TIC, alors que pour d'autres, une approche davantage axée sur le renforcement des capacités des TIC favorise le développement durable et le saut technologique.

Mots-clés: Développement durable, TIC, Capacités, Modèle VAR en panel, pays en développement

Introduction

Aujourd'hui, l'importance des technologies de l'information et de la communication (TIC) pour le développement économique et social et pour la gestion des catastrophes est reconnue. Les TIC représentent un large éventail de services, d'applications et de technologies, utilisant différents types de matériels et logiciels informatiques, fonctionnant souvent par des réseaux de communication (Rao, 2009). Elles constituent un levier efficace de modernisation et de simplification des procédures, et permettent d'entrevoir sa mise en œuvre dans plusieurs États du monde.

La littérature a montré que les TIC ont contribué d'une manière positive au développement durable (Breuil et al. 2008 ; Petit, 2009). Considérées comme un catalyseur potentiel de la production et de la consommation dématérialisées, les TIC ont largement démontré leur utilité et leur importance dans des domaines tels que l'éducation, les soins de santé, les services publics (Warschauer, 2004, Hilty & Ruddy, 2010). D'autres recherches scientifiques ont montré que les TIC ont des retombées néfastes sur l'environnement, la société et l'économie de par l'effet rebond relatif à leur usage (Deltour, 2010 ; Daly et Butler, 2009 ; Elliot, 2007 ; Molla et Cooper, 2009). L'utilisation des équipements TIC contribue de manière conséquente à la consommation en énergie et donc au réchauffement climatique.

En effet, si les objectifs de développement durable sont par nature universels, leur application est différenciée en fonction de niveau de développement des pays étudiés et de leurs priorités de développement.

Les pays développés ont des meilleures infrastructures des TIC, enregistrent une plus grande utilisation des TIC et un accès plus rapide aux innovations technologiques que les pays en développement où les TIC sont perçues comme un luxe improductif au regard des priorités aux besoins classiques de développement (nourriture, eau potable, santé publique, éducation, routes). Les pays en développement qui ont manqué l'ère de la révolution industrielle peuvent – ils se permettre de manquer celle de la révolution de l'information ou de considérer les TIC comme une véritable opportunité de développement ? C'est sur ce principe que se fonde cet article, dont l'objectif est de questionner les trois dimensions économiques, environnementales et sociales au regard des contraintes de développement des TIC, en insistant sur l'hypothèse de la capacité des TIC à intégrer ces trois dimensions.

La difficulté particulière à mesurer le poids économique et social des TIC dans le développement nous a amené à calculer deux indices relatifs au développement durable et à l'info-état. Ces deux indices nous permettent de comparer la situation des pays dans le temps.

Dans les pays en développement, certaines opportunités économiques des TIC ont pu se développer, mais cet optimisme technologique s'est contrarié par des chiffres publiés par l'UIT en 2015, quatre milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'Internet, ce qui les exclut de la société numérique mondiale et les empêche donc de profiter des avantages sociaux et économiques qu'apporte le développement durable. Pire encore, aujourd'hui des centaines de millions d'ordinateurs sont remplacés chaque année et une grande partie des déchets est enfouie sous terre ou envoyés illégalement dans les pays en développement (matériels d'occasion et non déchets). Brunel (2005b) indique que le concept développement durable¹ s'est imposé à Rio (1995) contre la position des pays en développement et n'apporte aucune solution véritable à la problématique du développement.

Eu égard les relations complexes entre les différentes dimensions du développement durable et les composantes des TIC, il apparaît nécessaire de progresser dans la compréhension des enjeux de l'avènement du développement des TIC pour le développement durable. Pour ce faire, nous adoptons une approche positive qui consiste à analyser les capacités disponibles et à étudier les solutions envisageables pour les exploiter. Il s'agit d'une approche des TIC par les capacités qui pourrait aider à mieux comprendre le rôle des TIC au service du développement durable (Sen, 2000, Anand, et al, 2009), et un modèle conceptuel qui permet d'analyser dans trois niveaux les impacts de cycle de vie, des actions étendues et structurels (Hilty et al, 2013).

Dans le cadre de cette approche, notre travail recourt aux estimations économétriques afin de mettre en relation le développement des TIC et ses effets sur le développement durable. L'analyse empirique porte sur un échantillon de 19 pays en développement sur une période 2000-2017.

La suite de cet article est organisée de la façon suivante. D'abord, après avoir revenu brièvement sur la durabilité des TIC, on met l'accent sur l'approche des capacités des TIC développée par Amartya Sen. Puis, on présente un modèle proposé par Hilty et al (2013) qui éclaire les relations sémantiques, conceptuelles, directs, indirects et de rebonds entre les trois piliers du

¹ La notion de développement durable a été définie en 1987 par Mme Brundtland, Premier Ministre norvégien pour répondre aux besoins des générations présentes mais sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.

développement durable et le positionnement des TIC. Ensuite, on décrit les données utilisées pour l'analyse empirique et la spécification économétrique retenue pour évaluer la relation entre les TIC et le développement durable. Les différents résultats obtenus sont discutés, où on s'interroge également sur la robustesse des résultats. Enfin, on conclut.

2. Les TIC et le développement durable

Au niveau international, plusieurs crises écologiques et sociales ont eu lieu dans le monde et ont fait prendre conscience qu'il faut un modèle plus durable susceptible de permettre d'assurer nos besoins sans détruire notre écosystème. Beaucoup admettent l'idée que les TIC (réseaux de télécommunications et informatique) aideront à préserver l'environnement par la réduction d'émissions de GES ou de pollution, à promouvoir un autre modèle social, moins inégalitaire ; et enfin à assurer une croissance économique stable. Dans cette section, nous séparons, pour des raisons discursives, les TIC et le développement durable tout en connaissant les liaisons fortes dans le réel.

2.1 Les TIC

Elles incluent toutes les formes de technologies (matériel et logiciels) utilisées pour traiter les informations et aide sa communication dans un format numérique - création, acquisition, traitement, stockage, récupération, transmission, échange, diffusion. **Le matériel** englobe les ordinateurs, les téléphones mobiles, les assistants numériques personnels (stylos), les imprimantes et les réseaux de télécommunications mobiles et sans fil, etc. **Le logiciel** comprend les applications associées et tels que le système d'aide à la décision (DSS), l'architecture orientée service (SOA), la gestion planification des ressources (ERP), vidéoconférence, commerce électronique, apprentissage en ligne et les communautés électroniques (c.-à-d. services virtuels).

Les TIC présentent trois caractéristiques spécifiques qui les distinguent des autres systèmes techniques. La première est liée aux deux notions qui sont au cœur de l'informatique: le système et le programme. La notion de système renvoie à une technologie structurée, englobante, qui est susceptible d'étendre ses impacts au-delà de son champ d'application. La notion de programme, fait référence à une technologie flexible et modulable selon les projets qu'elle sert.

La deuxième caractéristique des TIC réside dans leur malléabilité, qui repose en grande partie sur la composante logicielle. Le logiciel permet la réalisation des objectifs d'un projet informatique. Le logiciel permet d'atteindre ces objectifs en incorporant des valeurs et des rapports sociaux particuliers. La malléabilité permet les différentes modalités de façonnage

social au cours du cycle de vie d'un projet informatique (Woolgar et Grint, 1991). En fin, la troisième caractéristique est liée à la diffusion rapide des TIC dans l'ensemble de l'économie et de la société (tableau 1 en annexe).

2.2 Modèles de développement durable

La notion de développement durable (DD) constitue un domaine de recherche particulièrement favorable parmi les chercheurs, les autorités gouvernementales et les organisations internationales. Le développement durable est un problème relativement récent dans la mesure où il est apparu au cours du dernier quart du 20^e siècle, formant de nouveaux motifs d'amélioration du niveau de vie. C'est une façon d'organiser les sociétés de manière à leur permettre d'exister sur le long terme.

Les représentations du DD sont nombreuses : le modèle à trois piliers, le modèle à systèmes emboîtés et le modèle à approche systémique.

Le modèle à trois piliers place le développement durable à l'intersection de trois sphères d'activités des dimensions sociale, environnementale et économique. Il suppose que les trois sphères sont d'importance équivalente, interagissent au même niveau et sont interchangeables. Dans cette approche, le pilier économique occupe une place centrale et reste prépondérant, à tel point que le développement durable est parfois rebaptisé croissance durable.

Le modèle à systèmes emboîtés de vision intégrée permet de visualiser des perceptions différentes de la réalité et des priorités accordées aux différentes composantes du DD. Par l'emboîtement des systèmes entre eux, elle indique une hiérarchie, chaque notion étant englobée par une autre, considérée comme plus importante.

Le modèle de durabilité forte montre l'emboîtement dynamique des 3 systèmes économique, social et environnemental et représente leur interaction dans le temps et dans l'espace. Ce modèle considère l'environnement comme étant un élément essentiel du développement durable et non pas un de ses piliers. Les sous-systèmes société et économie n'ont pas la même valeur. Si une loi économique est confrontée à une loi biologique, c'est cette dernière qui l'emporte à moyen ou long terme. Ce schéma est généralement utilisé par les partisans de la durabilité forte où l'équité inter- et intra générationnelle est respectée

Le modèle à approche systémique montre l'importance de la biosphère comme système dans lequel prennent place des sous-systèmes avec un accent sur leur interdépendance. Il essaye également de rendre plus visible deux autres sous-systèmes : « empowerment » le système politique (en particulier sous forme d'autodétermination démocratique) et « equipment » englobant science et technologie. Ces deux éléments sont importants pour la durabilité.

3. Approche par les capacités, développement durable et TIC

L'approche par les capacités a été développée par Sen (1999). Puis elle a été utilisée pour refonder les analyses du développement durable. Ensuite, avec la montée en puissance des TIC et de l'économie solidaire, cette approche a été appliquée pour analyser les enjeux des TIC dans la perspective du DD.

3.1 L'approche de la capacité

La notion de capacité débouche sur la possibilité de choix entre différentes alternatives (effectivement réalisées et observables ou restant au niveau du choix potentiel). La capacité a été définie comme la liberté de choisir la vie que l'on souhaite mener (Sen, 1990). Anand, et al (2009) soulignent que la capacité met l'accent sur ce que les gens sont libres et capables de faire.

Cette approche a connu plusieurs extensions afin de l'adapter à la problématique de développement durable et de faire de cette approche un cadre conceptuel pertinent pour l'analyse du développement durable (Cruz, 2006 ; Zimmermann, 2006). Sen (1999) a redéfini le rapport entre le développement humain considéré comme une fin et la croissance économique considérée comme un moyen pour atteindre cette fin. Cette précision a permis de mettre l'accent non seulement sur les dimensions écologique ou économique mais aussi sur la dimension sociale du développement durable (Ballet et al. 2005).

Certains chercheurs ont rendu compte des interactions sociales au sein de l'approche des capacités par le biais de l'introduction des concepts de capacités collectives et d'agencité collective (Ibrahim, 2006 ; Ballet et al. 2007 ; Dubois et al. 2008). D'autres ont pris en considération la dimension écologique et de nombreuses capacités comme la subsistance, la protection, la créativité, l'identité qui sont requises pour satisfaire les différentes dimensions du développement humain (Duraiappah, 2004 ; Polischuck et Rauschmayer, 2012).

De même certaines capacités sont requises pour prendre en considération les limites de la biosphère (Jackson, 2009, Peeters et al. 2013) et l'impact négatif sur le capital naturel (Schultz et al. 2013). Le principe de précaution écologique appelle à une responsabilité qui prévoit l'avenir afin de prendre en compte les conséquences de nos actes sur les générations futures. Dans ce cas, les personnes peuvent réduire volontairement leur liberté si leurs actions vont avoir des conséquences négatives pour les générations futures (Ballet et Mahieu, 2009).

L'approche par les capacités offre donc un cadre d'analyse multidimensionnel pour évaluer la liberté réelle dont disposent les individus pour atteindre les différentes dimensions qui

regroupent leur bien-être (par exemple la santé, l'éducation, la participation politique, l'autonomie...).

3.2 L'approche par les capacités et le développement durable

Trois points peuvent illustrer en quoi l'approche par les capacités permet d'aborder les enjeux soulevés par le développement durable sous un angle nouveau ; celui de la multidimensionnalité de la qualité de la vie, de la liberté de choix et celui de la justice sociale; ce qui amène à parler de développement humain durable.

Le caractère multidimensionnel de cette approche facilite l'évaluation du bien-être que les populations obtiennent à partir des écosystèmes (approvisionnement, régulation et culturels). Ces trois catégories sont évalués en termes de développement humain à partir de l'analyse des « fonctionnements » qu'ils permettent d'obtenir (exemple bénéficier d'une eau potable, être protégé des événements extrêmes, etc.). Ce **caractère** permet aussi de discuter la question de la responsabilité et des capacités collectives dans la gestion du capital naturel qui fournit les services écosystémiques.

Le rapport sur le développement humain de 2011 (UNDP, 2011, p.17) souligne que: "Les générations actuelles ne peuvent pas demander aux générations futures de respirer un air pollué en échange d'une plus grande capacité à produire des biens et des services".

Le développement durable s'intéresse aussi bien des capacités de la génération actuelle que des capacités des générations futures (Sen, 2000). En d'autres termes, la génération actuelle est demandée de réduire le rythme du développement de ses propres capacités pour permettre l'émergence de celles des générations à venir.

La définition du développement durable, reprise dans le cadre de l'approche par les capacités, peut être décomposée en trois propositions. D'abord, la première est basée sur les libertés d'agir et d'être pour la satisfaction des besoins des générations actuelles. Les stratégies de développement humain visent à atteindre cet objectif de manière équitable au sein d'une même génération. Ensuite, la deuxième met l'accent sur la capacité des générations futures. Il s'agit de faire en sorte que les générations futures aient bien les ressources et les moyens de convertir ces ressources en libertés de faire et d'être. En fin, la troisième proposition fait le lien entre les deux propositions précédentes puis qu'elle pose implicitement un problème de comparaison intergénérationnelle des capacités de deux manières. D'une part, elle demande que l'accroissement des capacités de la génération présente ne réduise pas les capacités des générations futures. D'autre part, elle suppose implicitement que chaque génération ait autant de libertés d'agir et d'être.

3.3 L'approche par les capacités et les TIC

L'utilisation des TIC au service du développement (ICT4D) reste une priorité pour permettre aux personnes et aux communautés de participer au monde numérique.

Le Bureau de développement des télécommunications de l'UIT a lancé l'initiative pour un modèle intelligent de développement durable (Smart Sustainable Development Model ou SSDM) afin d'adapter les TIC au service du développement durable et en particulier au service de la gestion des catastrophes. Cette initiative basée sur la créativité et la coopération, a cherché à donner aux TIC un aspect plus humain tout en reconnaissant leur rôle essentiel dans le développement durable. La créativité a l'avantage de découvrir de nouvelles solutions TIC pour résoudre des problèmes pressants liés aux télécommunications d'urgence, à la gestion des catastrophes et au développement durable. Une bonne coopération facilite la réalisation des objectifs de l'initiative SSDM, à savoir l'identification du potentiel des TIC ainsi que l'utilisation et le partage de celui-ci.

Etant donné l'importance des TIC, Sen (2005) considère que l'accès au Web et la liberté de communication générale présentent un intérêt et une pertinence pour tous les Indiens» (p.160). Il a qualifié les mobiles de «liberté»-enhancing '(Sen, 2010a, p.2). Cette association entre les TIC et les libertés a en partie, expliqué la popularité croissante de l'application ou de la référence à l'approche par les capacités dans la recherche ICT4D.

Mais cette littérature ne s'est pas intéressée au débat sur les TIC et le développement durable. L'AC ne semble pas avoir figuré dans les nombreuses activités récentes autour d'ICT4D et du changement climatique, probablement en raison de la relation ambivalente entre le débat sur l'approche par les capacités et le développement durable.

Nous avons retenu cette approche puisqu'elle considère l'accès aux TIC n'est pas une fin en soi, mais plutôt le moyen d'atteindre des capacités valorisées.

4. Vers un cadre conceptuel pour les impacts des TIC sur le développement durable

À notre connaissance, peu de travaux ont étudié la question de développement durable par les TIC dans les pays en développement. Les raisons en viennent de l'argument du luxe improductif que constitueraient les TIC au regard des nombreuses priorités de développement (eau potable, santé publique, éducation), de la nature de ces technologies qui invitent à renouveler les outils en matière de développement (Dahmani, 2013) et de la difficulté particulière à mesurer le poids économique et social des TIC dans le développement.

Dans les pays développés, plusieurs chercheurs se sont intéressés de l'impact des TIC sur les trois piliers de développement durable. Les effets des TIC sont généralement classés en trois

grandes catégories. Une première classification des effets a été avancée par Berkhout et Hertin (2001). Les auteurs ont montré trois effets de TIC: effets directs de la production et de l'utilisation des TIC (premier ordre), effets indirects liés aux changements des processus de production et de système de distribution : substitution à fonction sociale identique (second ordre) et effets indirects liés aux modifications de style de vie et des fonctions sociales (troisième ordre). Gossart (2010) a distingué trois catégories d'effets rebond (directs, indirects, structurels). De sa part, Hilty, L.M. (2008) souligne que les applications des TIC débordent largement le secteur de leur production (un effet direct de premier ordre), les autres secteurs (un effet indirect de second ordre) et ont des répercussions plus profondes touchant le côté social (un effet systémique de troisième ordre).

Dans cet article, puisqu'on cherche à analyser comment les TIC offrent – elles une bonne prise au développement durable dans les pays en développement ? On propose une analyse des différentes catégories d'effets des TIC distinguant le descriptif du normatif. On présente un modèle proposé par Hilty et al. (2013). Ce modèle, appelé LES², permet de distinguer trois catégories d'impacts liés au cycle de vie, aux actions activées et aux changements structurels. On a retenu ce modèle puisqu'il explique comment ces trois types d'impacts peuvent se traduire dans les relations ambivalentes entre les TIC et les piliers de développement durable. Cependant, on décrit les trois impacts en commençant par le plus bas niveau et en remontant vers le haut (Figure 1) puis on présente comment les caractéristiques spécifiques des TIC peuvent modifier la donne dans les pays en développement.

4.1 Le modèle LES

La première catégorie d'impacts concerne le cycle de vie des TIC (niveau1). La méthode de cycle de vie couvre les risques liés à un produit ou à une technologie sur toute la chaîne. Elle a pour objectif d'améliorer des systèmes entiers et non des parties de systèmes et d'éviter le transfert des problèmes d'une étape du cycle de vie à une autre. Le logiciel est réputé être le principal contributeur aux initiatives de la suivi du cycle de vie d'un produit. Il fournit les outils permettant de mesurer, surveiller et modéliser les systèmes environnementaux. Les compteurs intelligents quantifient la consommation énergétique et fournissent des informations utiles aux consommateurs afin qu'ils modifient leur comportement. Le « green grid », consortium américain, s'est intéressé aux technologies permettant l'accroissement de l'efficacité du

² LES: Life-cycle impact, Enabling impact, and Structural impact

traitement de l'information et l'efficacité énergétique dans les centres de données. Dans les bâtiments, les applications des TIC permettent de contribuer à la surveillance des occupants des bâtiments et à la réduction de l'empreinte carbone dans l'environnement bâti.

La deuxième catégorie est liée à l'impact des actions motivées (niveau 2). Toutes les actions sont considérées comme des processus de production ou de consommation et les impacts des TIC seront considérés comme des types spéciaux de substitution. Le modèle LES distingue trois types d'impacts des actions motivées. Chaque impact étant basé sur la substitution et peut se produire dans les processus de production et de consommation. Ces impacts peuvent être définis comme des types spéciaux de substitution de ressources:

- Optimisation du processus : Substitution d'un immatériel à une ressource matérielle. Il s'agit d'une utilisation des TIC dans les processus de production pour améliorer les opérations et accroître l'efficacité. Le triangle de Spreng, qui décrit les interactions fondamentales entre le temps, l'énergie et l'information, fournit un cadre d'analyse de ces substitutions (Spreng, D., 2013). Par exemple, l'introduction de capteurs pour contrôler les lumières dans un bâtiment représente une optimisation du processus d'éclairage, qui n'implique pas de changement organisationnel ou comportemental. Pour le transport, les processus de production ou d'utilisation peuvent être optimisés en utilisant de l'information. La baisse de la dépense en carburant est une contrainte qui s'impose d'elle même aux utilisateurs. Par exemple, les conducteurs de véhicule (privé ou public) peuvent utiliser un système de navigation par satellite système pour optimiser l'itinéraire emprunté. L'effet d'optimisation est le même pour tous les chauffeurs.
- Substitution de média : Substitution d'une ressource matérielle à une autre matérielle. Par exemple les factures imprimées envoyées par courrier traditionnel sont remplacées par des factures envoyées via Internet.
- Externalisation du contrôle : Substitution d'une ressource immatérielle à une autre immatérielle

La troisième catégorie renvoie au profond changement structurel vers la dématérialisation et vers l'économie de réseaux. Breuil et al. (2008) soulignent que les TIC ont joué un rôle important dans la dématérialisation des procédures et la numérisation de certains outils de travail. La dématérialisation a entraîné des changements structurels dans les modes de production et de consommation. Plusieurs applications de dématérialisation ont été observées: la dématérialisation des factures, des documents commerciaux et logistiques (devis, bons de commandes, bons de livraison...), la dématérialisation des échanges bancaires (relevés,

virements, opérations boursières...), la dématérialisation des déclarations administratives (déclarations fiscales, de TVA, déclaration sociale). Toutes ces applications ont facilité les échanges entre les entreprises et les administrations et ont permis d'économiser les ressources et de diminuer le coût économique et environnemental des entreprises. Cependant, certains auteurs ont indiqué qu'il est difficile d'affirmer les effets positifs de la dématérialisation sur le développement durable (Flipo et al. 2013). La dématérialisation génère un « effet rebond.», c'est-à-dire qu'elle n'est pas associée à une diminution de la consommation, mais à une augmentation de celle-ci, car le progrès technologique conduit le consommateur à consommer plus (Schneider, 2003). On parle d'effet rebond lorsque les effets positifs des TIC sont compensés par des effets négatifs imprévus parfois pires que le problème originel qu'elles cherchaient à résoudre ou lorsque l'accroissement des consommations de matières et d'énergie induit par l'utilisation généralisée des TIC réduit l'effet positif des réductions de l'empreinte écologique obtenues par unité de produit. Par exemple, Herring et al. (2007) ont montré que le e-learning ne se traduisait pas par une réduction des émissions de CO2 ou de la consommation énergétique en raison d'effets rebond. La virtualisation des centres de données est un autre exemple de gains d'efficacité entraînant des effets rebonds dans les technologies numériques. La diminution du nombre de serveurs à stockage de données constant a conduit à une explosion de la demande d'espace de stockage de données. La capacité mondiale de traitement de données a augmenté cinq fois plus vite que la croissance économique (Hilbert et al. 2011).

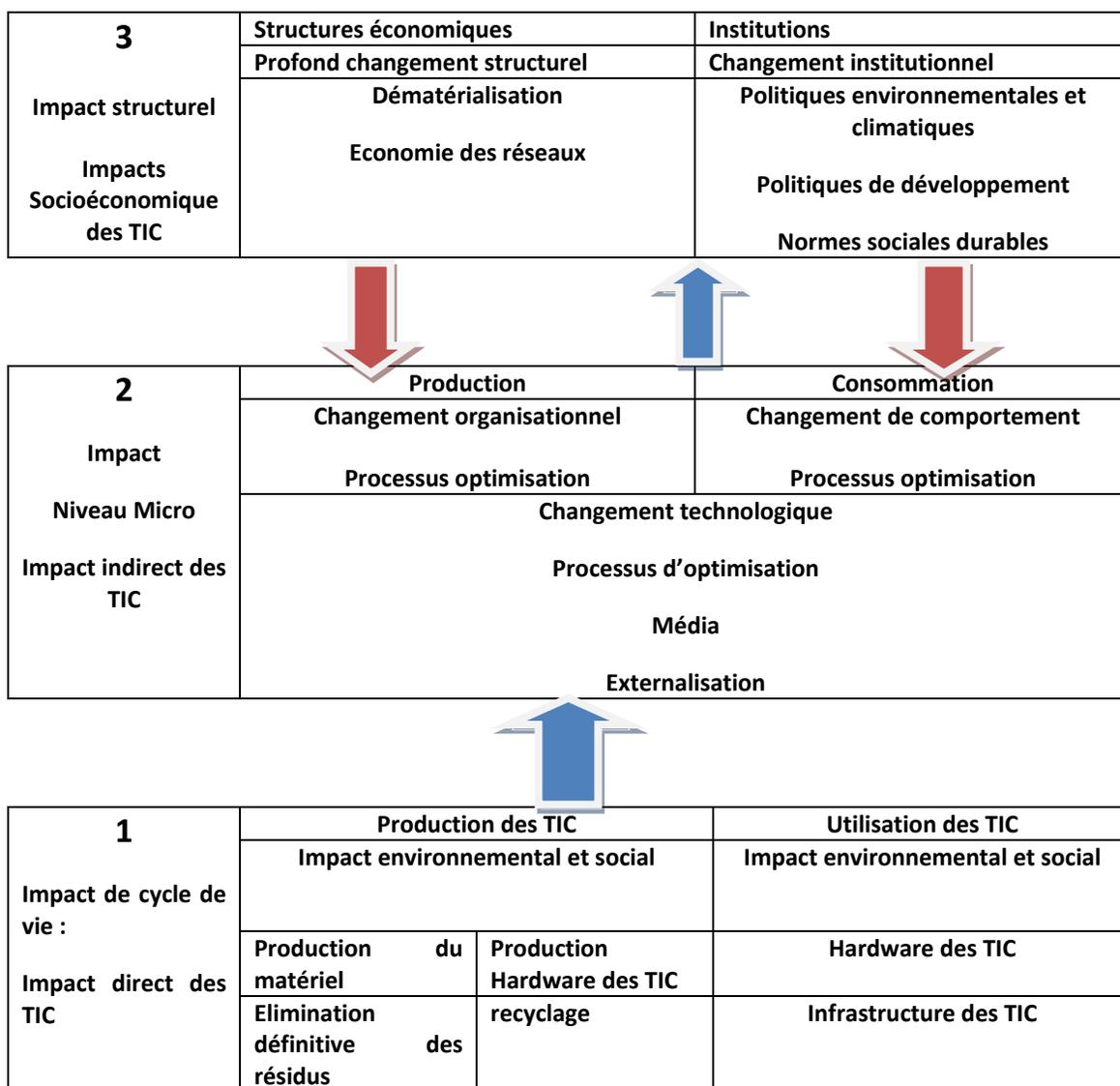
Le changement structurel réside dans l'apparition de l'économie de réseau. Il s'agit d'un nouveau mode de production qui a émergé avec le l'apparition d'Internet et, en particulier, des technologies Web 2.0. Les fondamentaux d'une telle économie n'est pas la société mais l'individu. En dépossédant de toute spécificité technico-organisationnelle, le réseau est devenu l'instrument d'une allocation des ressources. L'accès et les utilisations des TIC sont le résultat des tâches et d'appropriations individuelles qui renforcent la dynamique collective des réseaux. Cette évolution peut être pertinente pour la durabilité de deux manières. Premièrement, cela peut changer les schémas d'utilisation de ressources dans la production en général. Deuxièmement, les projets de développement visant à contribuer à la durabilité, s'impliquent dans les processus (Surowiecki, J. et al, 2004). Dans une société en réseau, la communication est plus efficace et les normes sociales liées à la durabilité évoluent rapidement.

Le facteur structurant ou indirect des TIC consiste à stimuler le dynamisme des autres secteurs d'activité en facilitant l'exécution de multiples tâches dans les entreprises ou dans l'administration. Un autre type d'effet structurel lié aux technologies numériques peut être

observé dans les services bancaires et financiers, les assurances, le transport aérien, la grande distribution. La plupart de ces branches ou secteurs d'activités dépendent de l'informatique, des réseaux et de l'Internet. Les marchés financiers sont reliés entre eux 24 heures sur 24, et les activités spéculatives telles que le trading à haute fréquence sont facilement réalisables.

Les changements dans le processus de production concernent aussi l'utilisation plus efficace des ressources naturelles telles que les énergies et les matières non renouvelables et aident les entreprises pour devenir plus concurrentielles. Les déchets qui sont considérés comme un mauvais résultat du processus de production, deviennent un intrant clé à réutiliser directement grâce à la récupération des matières ou à des technologies de transformation des déchets en énergie.

Figure 1 : Le modèle LES : Cadre conceptuel d'analyse des liens entre TIC et DD



Source : Construction personnelle sur la base Hilty, L.M., Aebischer, B. (2013).

4.2 Les TIC au service du développement des pays en développement : une réalité concrète

Le modèle, proposé ci dessus, a montré que les technologies numériques sont particulièrement prometteuses pour ce qui est de la réalisation des objectifs de développement durable. Cependant, malgré certains effets négatifs, ce modèle nous a éclairés sur la façon de concilier les TIC au développement durable à travers le rôle joué par l'information dans l'économie et la société modernes. En se basant sur ce modèle, trois idées fondamentales, de notre point de vue, aident à percevoir les TIC comme un levier de développement durable dans les pays en développement.

D'abord, le développement des réseaux de télécommunication, comme la téléphonie mobile et l'Internet, a symbolisé la montée en puissance des TIC. La baisse des coûts, des équipements et des services des TIC, a permis leur diffusion accélérée dans tous les secteurs de l'activité économique. Des technologies comme les logiciels, l'analyse de données massives et l'Internet des objets, peuvent contribuer à la réalisation des objectifs du développement durable, au travers de la dématérialisation de l'économie: l'information étant reproductible, peu consommatrice de matière et peu dissipatrice d'énergie. Ces technologies ont des applications importantes dans les domaines de la santé, de l'agriculture, de l'énergie, de conseils et expertises, de l'éducation, la gestion de l'eau et de la qualité de l'eau. Elles offrent des flux d'information en temps réel et permettent de contrôler et de gérer l'état et le comportement des objets connectés et des machines.

Les usages avancés de ces technologies permettent aux pays en développement de procéder à un saut technologique et de brûler les étapes de développement. Ces pays ont enregistré depuis 2005, le taux de croissance annuel cumulé le plus élevé du monde pour ce qui est de la pénétration de l'Internet et des abonnements aux services mobiles cellulaires.

Les gouvernements devraient élaborer des stratégies pour exploiter ces technologies aux fins de leurs objectifs de développement. Ces technologies sont disponibles sur des marchés très concurrentiels, transférables rapidement dans n'importe quel pays. De plus, elles ne nécessitent pas d'investissements massifs et coûteux dans des installations et des infrastructures. De même, l'existence de nombreuses sources d'information disponibles à la différence des autres industries ainsi que les logiciels libres favoriseraient les capacités d'absorption pour produire ou utiliser les TIC.

Ensuite, la réussite de la dématérialisation dépend de l'efficacité des systèmes d'innovations nécessaires. Dans les pays en développement, ces systèmes sont moins robustes et plus sujets à

des défaillances systémiques et des insuffisances structurelles. L'efficacité des systèmes d'innovation repose aussi bien sur les capacités des divers acteurs (pouvoirs publics, société civile, consommateurs et producteurs) à assimiler, adopter et diffuser des connaissances et des technologies que sur les relations qu'ils entretiennent

Pour la plupart des pays en développement, cependant, le manque de capacités signifie que ces possibilités résident le plus souvent dans l'adoption de technologies existantes plutôt que dans la mise au point de technologies nouvelles. Les effets transformateurs de la téléphonie mobile dans les pays africains en constituent un exemple.

Les technologies nouvelles et naissantes offrent aux pays en développement des possibilités de raccourci technologique c'est – à – dire sauter les étapes technologiques intermédiaires par lesquelles les pays industrialisés sont passés jusqu'à maintenant au cours du processus de développement.

Par exemple dans le secteur de l'énergie, il est possible de mettre au point de systèmes énergétiques décentralisés reposant sur des sources renouvelables. Ce moyen économique permet d'accélérer le développement durable.

Les possibilités de raccourci technologique permettent d'élaborer de systèmes d'aide à la décision environnementale, de réduire l'empreinte écologique des transports, de développer les modes de transports collectifs, d'analyser par satellite l'évolution de certains phénomènes (sécheresse, pollution etc.) et d'optimiser la gestion de l'éclairage, du chauffage et de la climatisation.

Enfin, les nouvelles tendances des systèmes intelligents montrent que l'exploitation optimale de leur potentiel dépend des ressources humaines, financières et technologiques disponibles. Dans ce cas, les pays en développement doivent saisir rapidement la chance et tirer avantage de la révolution de l'information en s'intéressant de plus en plus aux réseaux intelligents. La création d'un environnement favorable au marché dans lequel la responsabilité première en matière d'investissement et de fourniture de services appartient au gouvernement. Par exemple, aux Etats – Unis, l'Etat a joué un rôle essentiel dans le développement des TIC en créant des conditions réglementaires, concurrentielles et fiscales favorables à l'innovation et au dynamisme du secteur privé.

Les TIC peuvent élargir les possibilités des pays en développement de participer aux marchés internationaux. L'utilisation d'Internet permet aux entreprises prêtes à participer à l'économie du savoir d'entrer dans l'économie mondiale, en leur donnant accès à de l'information et à un savoir qui étaient auparavant hors de leur portée.

Le développement d'un certain niveau de compétence à l'utilisation des TIC chez l'ensemble des usagers pourrait leur permettre de résoudre eux-mêmes un certain nombre de problèmes simples et de diminuer le nombre de demandes aux services informatiques. La collaboration mondiale dans le domaine de la recherche scientifique permet d'ouvrir de nouvelles possibilités de conjuguer les moyens scientifiques les plus modernes avec des connaissances locales dans des domaines clefs du développement durable. Cette collaboration développe des capacités d'absorption suffisantes, cible la recherche et évite les activités superflues.

5. Données, approche méthodologique et résultats

5.1. Les données

Nous utilisons les données annuelles de 2000 à 2017 obtenues à partir du World Development Indicator (2018), sur un échantillon de 19 pays en développement.

5.1.1 Mesure du développement durable

Jusqu'au début des années 1990, le produit intérieur brut (PIB) s'est imposé comme indicateur traditionnel de la comptabilité nationale pour évaluer l'état de l'activité économique. En effet, même s'il demeure un outil intéressant, le PIB souffre de multiples imperfections ne lui permettant d'approcher le développement que de manière très partielle (Stiglitz *et al.* 2009). Devant cette limite, les initiatives se sont multipliées afin de proposer des indicateurs alternatifs de mesure de la richesse de l'économie, en rupture avec le cadre méthodologique gouvernant la construction du PIB.

Avec l'élaboration du nouveau concept de « développement humain », de nombreux indicateurs ont vu le jour depuis la fin des "30 glorieuses" pour compléter ou remplacer le produit intérieur brut, l'indice de développement humain, l'indice du mieux vivre, l'indice de bien-être durable, l'indice de richesse globale et l'indice du progrès social.

L'IDH le plus répandu des indicateurs alternatifs synthétise une moyenne trois composantes du développement humain à savoir le niveau de vie (PNB par habitant), l'éducation et l'espérance de vie³. Deux critiques souvent faites à l'IDH. La première concerne le caractère réducteur

³ D'un point de vue technique, la construction de l'IDH repose globalement sur deux étapes (PNUD, 2008). En premier lieu, il s'agit de déterminer un indice dimensionnel pour chacune des variables présentées ci-dessus. Cet indice de dimension, noté X_i , pour chaque variable i $i = 1$ pour la longévité $i = 2$ pour l'éducation $i = 3$ pour le revenu et pour un pays donné se déduit de : $X_i = \frac{\text{valeur observée de } x_i - \text{valeur minimale de } x_i}{\text{valeur maximale de } x_i - \text{valeur minimale de } x_i}$ (1) La valeur maximale associée à la variable x_i est la valeur la plus forte qu'un pays puisse atteindre dans cette dimension. Elle représente en quelque sorte l'objectif à réaliser à terme. La valeur minimale de x_i est la performance minimale qu'un pays est susceptible de réaliser dans cette dimension. Elle représente « la ligne de départ sur le parcours du développement ». En clair, l'indice X_i indique le chemin déjà réalisé par un pays sur la dimension par rapport au chemin total à parcourir.

d'une telle moyenne, qui ne reflète pas la diversité des situations dans chacune des dimensions de l'indicateur (santé, éducation, revenu). La deuxième est liée à son négligence les émissions polluantes pour l'environnement.

Sous l'impulsion du travail pionnier de Nordhaus et Tobin (1973), du célèbre rapport Brundtland (CMED, 1987) et des recommandations issues du sommet de Rio de 1992, de nombreuses propositions se sont intéressées à l'importance du concept de soutenabilité dans le processus de développement, aboutissant à ce qui est connu de nos jours sous l'appellation de « développement durable ».

Les issues à la fois du monde académique (Nourry, 2008; Pearce *et al.*, 2008) et du milieu institutionnel (la Banque Mondiale, Global Footprint Network, les Nations-Unies, etc.) ont essayé de couvrir les trois dimensions du développement durable telles que définies par la commission Brundtland (1987), à savoir les volets économique, social et environnemental, tout en s'efforçant de les regrouper pour obtenir une mesure scalaire unique (l'Indicateur de bien-être économique, IBEE, l'Indicateur d'épargne véritable, IEV, l'empreinte écologique ,EE, l'Indicateur sexospécifique de développement Humain, ISDH, l'indice de participation des femmes, IPF et l'indicateur de Pauvreté Humaine, IPH....).

Tasaki et al. (2010) ont identifié 1790 indicateurs de durabilité qui sont classés en 77 sous-catégories et finalement en quatre catégories principales. Ils suggèrent la création des indices permettant l'interprétation dans le temps. De même, Tanguay et al. (2009) citent 17 études évaluant l'utilisation d'indicateurs de développement durable en milieu urbain. À travers cette analyse un manque de consensus sur le cadre conceptuel et sur la sélection et le nombre optimal d'indicateurs est constaté.

Dans ce cadre, Rennings et Wiggering (1997) recommandent que les indicateurs de développement durable doivent être distingués selon que la durabilité est faible (selon la théorie néoclassique) ou forte (en l'absence de degré de substitution). Adelle et Pallemarts (2009) ont construit une série d'indicateurs pour examiner 40 projets de recherche de développement durable. En effet, pour les pays qui ont fait du développement durable leur priorité, la question de développement des TIC est centrale puisqu'elle conditionne autant les problèmes de mesure que ceux liés à l'évaluation de la mise en œuvre des politiques de développement (Bayon, 2007).

Dans la même lignée de plusieurs travaux, nous essayons de calculer dans cet article un indice qui prend en considération les différentes dimensions de la soutenabilité: l'environnement (dimension centrale mais non exclusive de la solidarité inter générationnelle), la sphère économique et la dimension humaine et sociale. Cet indicateur devrait permettre de procéder à des comparaisons entre pays et dans le temps.

Au fil des années, ces travaux vont être affinés pour déboucher sur ce qu'on appelle aujourd'hui les « indicateurs de développement humain » (PNUD, 2008), à savoir,

Cependant, si ces indicateurs caractérisent, plus ou moins bien, les enjeux des différents pays face au développement durable, nous cherchons à ce qu'ils sont mieux adaptés aux caractéristiques de la société du savoir faire et de l'économie numérique. C'est précisément ce point qui a guidé notre recherche dans cet article.

À cet effet, selon la disponibilité des données nous sélectionnons certains indicateurs se focalisant directement sur la durabilité. Nous pouvons nous appuyer sur les bases méthodologiques de l'IDH⁴, facilement transposables à l'ensemble des pays, mais en y apportant des modifications destinées à le rendre compatible à la problématique du développement durable. C'est précisément l'option que nous avons retenue dans ce travail. En d'autres termes, nous introduisons, dans l'IDH standard, l'influence de la soutenabilité à la fois économique et environnementale. Concernant la soutenabilité économique, ce travail est à notre connaissance la première tentative. S'agissant de la soutenabilité environnementale, la littérature appliquée fait apparaître plusieurs articles qui ont essayé de construire un « PIB vert ». Malheureusement, aucun d'entre eux ne peut être étendu au cas spécifique des pays en développement.

Cet apport nous permet en définitive de construire ce que nous appelons « l'Indicateur de Développement Humain Soutenable » (IDHS) pour un échantillon de 19 pays en développement et d'établir une nouvelle évaluation, plus réaliste, de l'état de ces pays dans le domaine du développement.

L'IDHS est l'IDH amélioré. Il est composé de quatre grandes dimensions. Les deux premières, la longévité et l'éducation, ne changent pas par rapport à l'IDH standard. La troisième dimension est donnée par le PIB réel par tête (en PPA), mais ajusté d'un facteur de vulnérabilité économique. Une manière simple de procéder est de multiplier l'indice dimensionnel du revenu par $(1-VE)$, la variable VE étant un indice de vulnérabilité économique à déterminer. Plusieurs

⁴ - **l'IDH**, dont le caractère incontournable, tant comme indicateur précurseur que comme source de débats et donc d'avancées dans les recherches en cours, justifie d'être examiné isolément des autres mesures.

possibilités sont proposées en la matière dans la littérature⁵. La quatrième dimension mesure la performance sur le plan de la préservation de l'environnement.

Finalement, l'IDHS se déduit de manière simple de la formule générale suivante :

$$IDHS = \frac{H_1 + H_2 + (1-VE)H_3 + (1-H_4)}{4} \quad (1)$$

Les pays ont été classés selon leur niveau de développement durable soutenable et répartis en deux groupes (Tableau 2 en annexe)

5.1.2 Mesure de TIC

Le cadre conceptuel repose sur la mesure des notions d'info-densité et d'info-utilisation.

En tenant compte de la disponibilité des données, nous avons soumis chaque indicateur à une analyse statistique complète. La mesure de l'indicateur info-densité passe par la mesure du capital en TIC et des compétences en TIC. Or, aucune masse d'information statistique ne permet de mesurer précisément l'une ou l'autre de ces composantes. Dans le cas du capital en TIC, il existe toutefois suffisamment d'indicateurs valables pour mesurer l'étendue des réseaux. Et nous restreignons de fait notre mesure du capital en TIC à celle des réseaux, d'ailleurs utile en ce qu'elle révèle l'état de préparation et le potentiel d'un pays à l'égard de son infrastructure.

Nous avons construit un indice de développement des TIC qui repose essentiellement sur les indicateurs d'accès des TIC à savoir les abonnements au téléphone fixe pour 100 habitants (**TF**), les abonnements au téléphone mobile par 100 habitants (**TM**) et le pourcentage de ménages ayant accès à Internet (**Internet**).

$$\text{Réseaux} = \sqrt[3]{TF \times TM \times Internet} \quad (2)$$

Les compétences en TIC sont évaluées de façon approximative par le biais d'indicateurs génériques en matière d'éducation. Les travaux qui se sont intéressés de la mesure des compétences en TIC demeurent très sommaires, surtout en ce qui a trait à l'obtention des données nécessaires pour dégager des comparaisons entre un grand nombre de pays. Nous avons quant à nous retenu les indicateurs suivants : Le taux d'alphabétisation des adultes, le taux brut de scolarisation primaire, le taux brut de scolarisation secondaire et le taux brut de scolarisation supérieure.

Nous obtenons davantage de différenciation des indicateurs liés aux taux de fréquentation des niveaux secondaire et tertiaire, qui reposent sur l'acquisition de compétences plus poussées et,

⁵ Cette notion s'est imposée dans les grandes instances internationales (ONU, PNUD, FMI, OCDE, Banque mondiale...) qui ont tenté de lui forger des indicateurs statistiques. Des indicateurs de vulnérabilité économique (EVI) permettent ainsi de comparer les situations nationales, régionales

de ce fait, correspondent mieux aux compétences en TIC. C'est pourquoi nous leur accordons un plus grand poids dans nos calculs.

Cet indice est composé des indicateurs liés aux réseaux et aux compétences. Ces indicateurs sont sélectionnés en fonction de leur disponibilité et de leur utilité présumée.

Les indicateurs liés aux réseaux comprennent les lignes téléphoniques principales par 100 habitants, les téléphones cellulaires par 100 habitants et les nombre d'utilisateurs d'internet par 100 habitants.

Les indicateurs liés aux **compétences** comprennent le taux d'alphabétisation des adultes, le taux de scolarisation bruts (**éducation** primaire, éducation secondaire **et** éducation supérieure).

Taux de scolarisation brut = (primaire + 2 x secondaire + 3 x tertiaire)/6

Compétence = $\sqrt{\text{Scolarisation} \times \text{Alphabétisation}}$ (3)

Info-densité = $\sqrt{\text{Réseaux} \times \text{Compétence}}$ (4)

Ce regroupement révèle d'emblée les différents niveaux d'écart qui existent entre le niveau de développement durable soutenable et leur niveau de TIC. Par exemple, le groupe à l'info-densité très élevée affiche une part de PIB par habitant supérieure à la valeur proportionnelle de l'ensemble de l'échantillon, reflétant la présence de nombreux pays riches (Tableau 3 en annexe).

Le groupe des pays à l'info-densité relativement élevée affiche des niveaux très similaires d'IDHS, tandis que le groupe de pays présentent un IDHS faible reflétant la présence en leur sein de pays à faible niveau d'info – densité.

La figure 2 présente l'IDHS et les info-densités des pays choisis. Il est clair que les quatre pays du Golf (Bahreïn, Kuwait, Oman, Qatar), la Jordanie, la Turquie et la Tunisie affichent un IDHS élevé par rapport autres pays de l'échantillon. En conséquence, non seulement l'IDHS est il beaucoup plus élevé que la moyenne globale, mais l'écart de l'info-densité et de l'IDHS de ces pays s'est en outre réduit.

Figure 2 : Comparaison des pays de l'échantillon selon le niveau des TIC et l'IDHS



Source : Construction personnelle

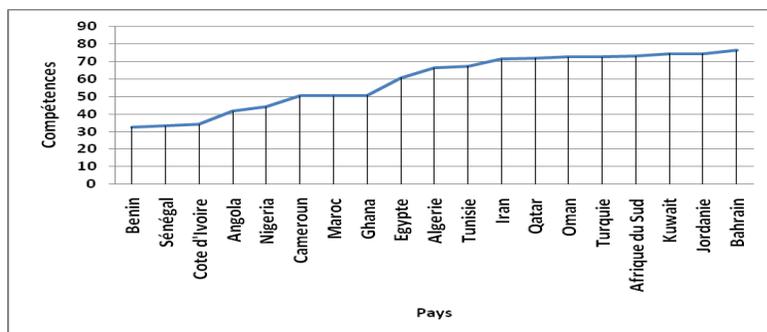
Tous ont néanmoins connu une croissance significative de leur info-densité au cours de la période à l'étude (2000-2017), quoiqu'à des degrés variables.

Fait intéressant, l'info-densité de l'Afrique du Sud est élevée à celle de la moyenne, alors que son IDHS est en moyenne faible. La Côte Ivoire et le Cameroun ont également connu une période de forte croissance de leurs info-densité entre 2000 et 2017, surpassant à cet égard d'autres pays de l'Afrique.

La comparaison des compétences dans les pays visés au cours de la période de 2000 à 2017 est illustrée dans la figure 3. Dans l'ensemble, tous les pays ont progressé, à quelques exceptions: Bénin, Sénégal, Côte d'Ivoire, Angola, Nigéria, et le Cameroun.

Le Bahreïn, la Jordanie et le Kuwait et l'Afrique du Sud sont en tête du peloton pour cet indice.

Figure 3 : Comparaison des pays de l'échantillon selon le niveau des compétences



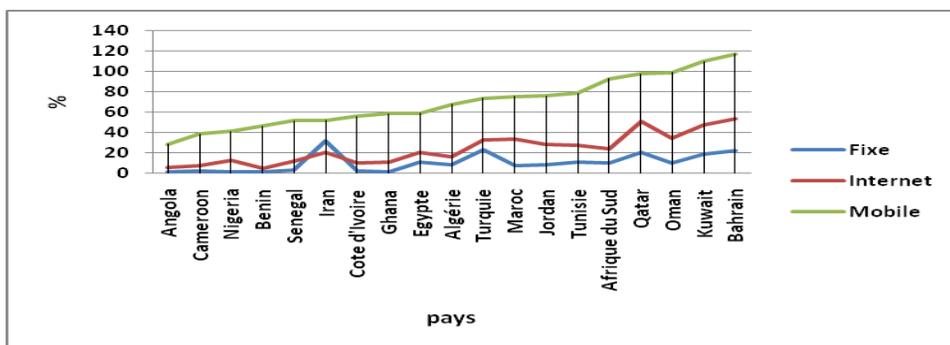
Source : Construction personnelle

Dans les pays de l'échantillon, l'utilisation des TIC s'est accrue ces dernières années. Mais la diffusion des autres technologies numériques comme l'Internet, n'a pas connu la même progression du secteur de la téléphonie mobile. La cherté du matériel informatique et

l'analphabétisme sont parmi les grands obstacles. Il existe un écart remarquable entre certains pays de l'Afrique et les autres régions, comme les pays du Golfe et les pays MENA en termes d'accès à certaines technologies de l'information et de la communication. Les statistiques de l'union internationale des télécommunications (IUT) montrent nettement que certains pays de l'Afrique ne sont pas encore entrés dans l'ère du numérique.

La figure 4 montre que la téléphonie mobile a largement dépassé la téléphonie fixe dans tous les pays étudiés. Cela démontre clairement que, dans ces pays, les téléphones mobiles présentent beaucoup plus d'attrait que les téléphones fixes et ceci pour des raisons de souplesse et d'autonomie. Les besoins et les styles de vie actuels ont fait de la téléphonie mobile et d'Internet des éléments clés de la vie familiale et des sources d'information, de communications et de réseautage social et même aussi de divertissements.

Figure 4 : Comparaison des pays de l'échantillon selon le niveau de l'info-utilisation



Source : Construction personnelle

5. 2. Méthodologie économétrique du modèle VAR en Panel

Le modèle empirique adopté dans le cadre de ce travail est inspiré des modèles qui ont étudié les effets des TIC sur la croissance économique (Yousefi, A. 2011, Farhadi et al., 2012, Majeed et al., 2018, Niebel, 2018).

L'hypothèse centrale du modèle est que le niveau de développement des TIC est lié aux dimensions économiques, sociales et environnementales de développement durable.

Cependant, pour rechercher la relation entre TIC et IDHS, on a introduit la variable taux d'ouverture qui est rencontrée dans la revue de littérature sur les impacts des TIC.

Les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent du site de la Banque Mondiale pour la période 2000–2017. Ces données sont bien renseignées pour dix neuf pays en développement. Il s'agit de l'Afrique du Sud, l'Algérie, Angola, Bahreïn, Bénin, Cameroun, Egypte, la Côte d'Ivoire, le Ghana, l'Iran, la Jordanie, le Kuwait, le Nigeria, le Maroc, Oman, le Qatar, le Sénégal, la Tunisie et la Turquie.

La méthodologie fondée sur un modèle VAR en Panel nécessite plusieurs étapes notamment la stationnarité des variables, la détermination du nombre de retard optimal, l'estimation du VAR, et le test de causalité entre les variables dépendantes.

Pour ce qui concerne la stationnarité, Aspergis et Payne (2009) utilisent le test d'IPS qui est plus général et plus populaire et basé sur le principe du test d'ADF. Notons que le test de racine unitaire en panel de Breitung (2000) et Levine et al. (2002) suppose une racine unitaire autorégressive homogène (sous l'hypothèse alternative, le coefficient autorégressif est le même pour tous les individus pour le test LLC), alors que les tests de racine unitaire de Im, Pesaran et Shin (2003) prennent donc en compte l'hétérogénéité (Hurlin et Mignon 2005).

Ensuite, la détermination du retard optimal a été faite en utilisant les critères d'information que sont: MMSC-Bayesian information criterion (MBIC), MMSC-Akaike's information criterion (MAIC) and MMSC – Hannan and Quinn information criterion (MQIC).

Le test de Hansen (1982) permet de vérifier si les instruments utilisés dans la régression sont valides (il repose sur l'hypothèse nulle de validité des instruments utilisés).

Enfin la cointégration a été testée par la méthode de Westerlund (2007) ainsi que le test de causalité au sens de Granger (1969) qui permet d'étudier les liens de causalité entre les deux variables. Sur la base des résultats du test de racine unitaire en panel, nous procédons au test de cointégration en panel, nous considérons que globalement, toutes les variables sont intégrées d'ordre 1.

5.3 Présentation et discussion des résultats

Le tableau 5 résume les résultats du test de stationnarité des trois variables utilisées dans le modèle. Les résultats révèlent que l'indice de développement durable est stationnaire en niveau.

Les deux autres variables sont toutes I(1) c'est-à-dire stationnaires en différence première.

Pour analyser la relation causale entre l'IDHS et le niveau des TIC, on adopte le test de cointégration en panel suggéré par Westerlund (2007) qui a développé quatre tests de cointégration en panel, l'idée sous-jacente étant de tester l'absence de cointégration tout en déterminant si les individus du panel peuvent adopter chacun un modèle à correction d'erreur.

Les tests statistiques G_a et G_t test $H_0 : a_i = 0$ pour tout i contre $H_1 : a_i < 0$ pour au moins un i .

Les tests statistiques P_a et P_t combinent l'information de toutes les séries temporelle et testent $H_0 : a_i = 0$ pour tout i contre $H_1 : a_i < 0$ pour tout i .

Le rejet de H_0 est donc considéré comme le rejet de non cointégration pour le panel tout entier. Lorsque les séries individuelles sont suspectées être corrélées, les valeurs critiques robustes peuvent être obtenues à partir du « bootstrapping ».

Des quatre statistiques de Westerlund (2007) construites avec les données des pays de l'échantillon, les statistiques P_t et P_a évoquent l'acceptation de l'hypothèse nulle de non cointégration entre les variables l'IDHS et les TIC pour le panel tout entier (tableau 4).

La statistique G_t montre aussi l'acceptation de l'hypothèse nulle de non cointégration entre ces variables au niveau individuel c'est-à-dire pour au moins un pays.

Les statistiques conduisent à l'acceptation de l'hypothèse de non cointégration entre les deux variables tant au niveau du panel qu'au niveau individuel. En somme, le modèle vectoriel autoregressif peut être adopté pour tout le panel tout entier et même pour les deux groupes des pays pris individuellement.

Suite aux résultats du test de cointégration nous estimons le modèle **Var** en panel pour tester la causalité de Engel et Granger (1987). Selon les résultats consignés dans le tableau 7 en annexe, au sens de Granger, il y a :

- Une causalité unidirectionnelle entre l'IDHS et les TIC pour l'ensemble des pays de l'échantillon et pour le premier groupe de pays.
- Une causalité bidirectionnelle entre l'IDHS et les TIC pour le deuxième groupe de pays,

Les résultats de l'analyse en panel ne sont pas identiques pour les deux groupes de pays.

On a ainsi testé l'hypothèse de connaître si les TIC ne causent pas le développement durable et vice versa.

Nous constatons qu'au seuil de 5 %, le test de Granger laisse présager d'un lien de causalité unidirectionnelle entre TIC et développement durable. Autrement, c'est la croissance du secteur TI qui cause le développement durable et non l'inverse pour le deuxième groupe de pays, soutenant ainsi la thèse qui voudrait que ce soit l'expansion du secteur TI qui détermine le développement durable.

En d'autres termes, il faudrait un niveau minimum de développement des TI avant d'observer ses effets bénéfiques sur le développement durable. Ce résultat s'explique pour l'essentiel par la spécificité même de l'économie de certains pays en développement qui ne bénéficient toujours pas d'un développement des TI.

Pour le premier groupe de pays, la relation entre développement durable et TIC est unidirectionnelle. Autrement dit, au sens de Granger les TIC causent le développement durable et non l'inverse. La relation entre le développement durable et les TI est unidirectionnelle.

Pour le deuxième groupe de pays, la relation entre le développement durable et les TIC est bidirectionnelle. En effet, une augmentation du niveau de développement des TIC se traduirait par un développement durable soutenable et vice versa. En effet, puisqu'au sens de Granger, le développement durable engendre une amélioration de développement des TIC, ce secteur peut être une force positive présentant des avantages pour le développement durable soutenable, à condition que les infrastructures socioéconomiques de base, indispensables et préalables à toute stratégie de développement soient réalisées,

Les résultats de la modélisation, résumés dans le tableau 9, montrent que la majorité des variables des modèles sont significatives au seuil de 5%.

En effet, pour le panel tout entier, pour l'équation 1, les résultats révèlent que les TIC affectent positivement et significativement le développement durable. Le coefficient associé à la variable explicative, degré d'ouverture, est positive et significative.

Pour l'équation 2, l'IDHS et le degré d'ouverture commerciale n'ont pas d'effet significatif le l'indice des TIC.

Cependant, l'importance de cette causalité diffère fortement entre les pays de notre échantillon.

Pour le groupe 1, les résultats de l'équation (1) révèlent qu'une augmentation de l'indice des TIC retardé d'une année et du taux d'ouverture induit une augmentation de niveau de l'IDHS

Pour l'équation (2), le degré d'ouverture commerciale a un effet positif sur l'indice de TIC alors que l'impact de l'IDHS n'est pas significatif

Pour le premier groupe des pays, il existe une causalité unidirectionnelle: les TIC affectent positivement et significativement le développement durable.

Pour le groupe 2 des pays où l'indice de développement durable est supérieur à la moyenne, il existe une causalité bidirectionnelle qui va des TIC vers le développement durable et vice versa.

Nous notons que le degré d'ouverture commerciale a un effet significatif sur le développement des TIC mais son effet sur le niveau de développement durable n'est pas statistiquement significatif.

De façon globale, les résultats de l'étude révèlent l'existence d'une causalité réciproque entre les TIC et le développement durable pour le groupe des pays où l'indice de développement durable est supérieur à la moyenne. Ces résultats valident donc l'utilisation du Panel-VAR.

Pour le premier groupe, une amélioration des TIC induit une augmentation de l'indice de développement durable.

Pour les deux groupes de pays, l'effet du degré d'ouverture commerciale est très important pour le développement des TIC. Toutes choses égales par ailleurs, ce sont encore les pays où le

niveau de développement durable soutenable le plus élevé pour lesquels la causalité, qui va du développement durable vers les TIC, est la plus forte et la plus significative. Les externalités technologiques ne sont majoritairement liées au développement durable que dans certains pays qui affichent un niveau de développement durable élevé.

Conclusion

Deux axes de réflexion ont été abordés dans cet article : d'une part le problème des relations entre l'info – état, appelé TIC, et les trois dimensions de développement durable et d'autre part, les difficultés et les perspectives de mesure de développement durable et des TIC dans une optique de comparaisons entre les pays. L'approche suivie dans cet article consiste à examiner la capacité des TIC à intégrer les trois dimensions de développement durable. Les conclusions sont les suivantes :

En premier lieu, les TIC entant que des technologies génériques et transversales interviennent dans l'ensemble des secteurs d'activités et interagissent avec un nombre important de facteurs d'ordre économique, social et environnemental.

En second lieu, le fait d'articuler la vision du développement des TIC avec celle du développement durable, au travers de l'approche par les capacités, a permis d'explicitier les fondements d'un développement durable. C'est le développement des TIC qui garantit l'amélioration des capacités de bien-être pour tous au sein de chaque génération en veillant, au moyen d'une transmission équitable des capacités d'une génération à l'autre. L'accroissement des capacités au sein d'une génération donnée ne compromet pas la constitution des capacités des générations futures.

En troisième lieu, l'estimation économétrique du modèle VAR montre un impact positif et significatif des TIC sur le développement durable. Lorsque ces technologies sont disponibles, leur utilisation extensive est la preuve du succès qui peut provenir d'un niveau de développement durable élevé.

Il s'avère important de comprendre comment nous pouvons être en mesure d'utiliser la technologie au profit de tous les niveaux de la société. Ainsi, il est profitable pour les pays en développement d'être présent dans l'économie de savoir, en dressant un cadre national assignant aux TIC un rôle de soutien au développement national et à la croissance socio-économique.

En quatrième lie, on a retenu deux groupes de pays: un groupe qui affiche un IDHS élevé, pour lequel il existe une relation de causalité bidirectionnelle entre les TIC et l'IDHS et un groupe qui affiche un IDHS faible pour lequel, au contraire, il existe une relation de causalité

unidirectionnelle des TIC vers IDHS. Ainsi, les avantages économiques tirés des TIC ne seront pas vus jusqu'à ce que le pays dispose d'un niveau de développement élevé suffisant pour rendre la pénétration des TIC économiquement viable pour la majorité.

Bibliographie

- Adelle, Camilla and Marc Pallemarts. (2009). "Sustainable Development Indicators: Overview of relevant FP-funded research and identification of further needs." European Union.
- Anand, P., Hunter, G., Carter, I., Dowding, K., Guala, F. & Van Hees, M. (2009). The Development of capability indicators. *Journal of Human Development and Capabilities*, 10(1), 125-152.
- Ballet, J. and Mahieu, F. R. (2009). Capabilité et capacité dans le développement: Repenser la question du sujet dans l'oeuvre d'Amartya Sen. *Revue Tiers Monde*, 198, 1-10.
- Ballet, J., Dubois, J. L. and Mahieu, F. R. (2007). Responsibility for each other's freedom: Agency as the source of collective capability. *Journal of Human Development*, 8(2), 185-201.
- Bayon D. (2007). Des économies vulnérables et dépendantes. In : Levratto N. (ed), *Comprendre les économies d'outre-mer*. Paris : L'harmattan (chapitre 2).
- Berkhout, F., Hertin, J.(2001). Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: Speculations and Evidence. Report to the OECD. <http://www.oecd.org/dataoecd/4/6/1897156.pdf> (2001). Accessed 2 June 2014
- Breuil H., Burette D., Flürty-Hérard B., Cueugnet J., Vignolles D., (2008). TIC et développement durable. Rapport du CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable) & CGTI (Conseil général des technologies de l'information), Paris, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire, ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, http://www.handiplace.org/media/pdf/rapport_tic.pdf.
- CMED (Commission mondiale sur l'environnement et le développement), 1987, *Notre avenir à tous*, trad. franç. 1988, Editions du fleuve, Montréal.
- Cédric Gossart (2010), "Stratégies de dématérialisation: Insurmontables effets rebond?", ANF EcoInfo, Autrans, du 12 octobre 2010 au 15 octobre 2010
- Cooper, C. (1994). Science and Technology in Africa Under Conditions Of Economic Crisis And Structural Adjustment. UNU-INTECH Working Paper Series No.4. Maastricht, the Netherlands: UNU-INTECH
- Cruz, I. (2006). Human Development assessment through the Human-Scale Development approach: integrating different perspectives in the contribution to a Sustainable Human Development Theory. Thèse de Doctorat, Université Polytechnique de Catalogne.
- Dahmani Ahmed, (2013) « Les TIC au service du développement en Afrique : une approche par les capacités » In Jean-Michel LEDJOU et Hanitra RANDRIANASOLO-RAKOTOBÉ, *Des réseaux et des hommes ; Les Sud à l'heure des technologies de l'information et de la communication*, Editions KARTHALA et GEMDEV, 2013, p. 301.
- DALY H.E., (1990), « Sustainable Development: From Concept and Theory to Operational Principles », *Population and Development Review*, Vol. 16, Supplement: Resources, Environment, and Population: Present Knowledge, Future Options, pp. 25-43
- Daly, M. et T. Butler (2009). Environmental Responsibility and Green IT: An Institutional Perspective. Proceedings of the European Conference on Information Systems (ECIS'2009), Verona, Italy.
- Deltour, F. (2010). Peut-on produire des « TIC vertes » ? Equipementiers et parties prenantes dans le débat sur le caractère écologique des TIC. 15ème colloque de l'AIM. La Rochelle.
- Dubois, J-L., Brouillet, A-S., Bakhshi, P., Duray-Soundron, D. (Eds.). (2008). Repenser l'action collective: Une approche par les capacités. L'Harmattan, Paris.
- Duraiappah, A.K. (2004). Exploring the links: human well-being, poverty and ecosystem services, The United Nations Environment Programme and the International Institute for Sustainable Development.
- Elliot, S. (2007). Environmentally Sustainable ICT: A Critical Topic for IS Research? Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS, 2007), Auckland, New Zealand
- Farhadi, M.; Ismail, R.; Fooladi, M. Information and communication technology use and economic growth. *PLoS ONE* 2012, 7, e48903.
- Flipo F., Dobré M., Michot M., 2013. La face cachée du numérique. L'impact environnemental des nouvelles technologies. Paris, Éditions L'échappée.
- Gonel, F., & Akinci, A. (2018). How Does ICT-Use Improve the Environment? The Case of Turkey. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 15(1), 2-12.

- Granger, C.W.J, (1969), Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross spectral Methods, *Econometrica*, 37, 424–438.
- Herring, H. et R. Roy (2007). Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. *Technovation* 27(4) : 194-203.
- Hilbert, M. et P. López (2011). The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. *Science* 332(6025) : 60-65.
- Hilty, L. M., Lohmann, W., Aebischer, B. & Andersson, G. (2013). ICT for Sustainability. Proceedings of the First International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainability, ETH Zurich, February 14-16.
- Ibrahim, S. (2006). From individual to collective capabilities: The capability approach as a conceptual framework for self-help. *Journal of Human Development*, 7(3), 397–416.
- Majeed, M. T., & Ayub, T. (2018). Information and Communication Technology (ICT) and Economic Growth Nexus: A Comparative Global Analysis. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences*, 12(2), 443-476.
- Molla, A. et V. Cooper (2009). "Green IT readiness. A framework and preliminary proof of concept" *Australasian Journal of Information Systems* 16(2): 19.
- Niebel, T. (2018). ICT and Economic Growth—Comparing Developing, Emerging and Developed Countries. *World Development*, 104, 197-211.
- Nourry M., (2008), « Measuring sustainable development: some empirical evidence for France from eight alternative indicators », *Ecological Economics*, Vol. 67, n°3, pp. 441-456
- Pearce D.W, Hamilton K., Atkinson G.,(2008) « Measuring sustainable development: progress on indicators », *Environment and Development Economics*, Vol. 1, n°1, pp. 85-101.
- Pedroni, P., “Panel Cointegration, Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests with an Application to the PPP Hypothesis”, *Working Paper in Economics*, 1995, 92-013, Indiana University.
- Pedroni, P., “Panel Cointegration. Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests with an Application to the PPP Hypothesis”, *Econometric Theory*, 2004, 20(3). pp. 597-625.
- Peeters, W., Dirix, J. and Sterckx, S. (2013). Putting sustainability into Sustainable Human Development. *Journal of Human Development and Capabilities*, vol.14, no.1, 58–76.
- Perron, P., “Test consistency with varying sampling frequency”, *Econometric Theory*, 1991, 7,341–368.
- Plepys, A. (2002). The grey side of ICT. *Environmental Impact Assessment Review* 22(5), 509-523.
- PNUD (2005) *15 années de publication du rapport mondial sur le développement humain 1990- 2004*, CD-Rom base de données statistiques, New York, Programme des Nations Unies pour le développement
- Rennings.K and Wiggering.H (1997). Steps towards indicators of sustainable development: linking economic and ecological concepts. *Ecological Economics* 20: 25-36
- Sen Amartya K., 1985a, *Commodities and Capabilities*, Amsterdam, North Holland.
- Sen, A.K. (2000). *Social Exclusion: concept, application and scrutiny*. Social Development Paper No. 1, Manila: Asian Development Bank.
- Sen, A.K. (2005). Human rights and capabilities. *Journal of Human Development*, 6(2), 151-166.
- Sen, A.K. (2009). *The Idea of Justice*. Harvard University Press.
- Sen, A.K. (2010a). The mobile and the world. *Information Technologies & International Development*, 6,(Special Edition), 1-3.
- Sen, A.K. (2010b). Introduction. In United Nations Development Programme, *Human Development Report 2010. The real wealth of nations: pathways to human development*. New York: Palgrave Macmillan, vi-vii.
- Schneider, F. (2003). "L'effet rebond." *Ecologiste*. Edition française de *The Ecologist* 4(3): 45.
- Spreng, D. (2013). Interactions between Energy, Information and Growth. In *ICT4S 2013, Proceedings of the First International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainability*, Zurich, Switzerland, 14–16 February 2013; ETH Zurich: Zurich, Switzerland, 2013; pp. 6–7.
- Sreekumar, T.T. & Rivera-Sánchez, M. (2008). ICTs and development: revisiting the Asian experience. *Science Technology Society*, 3(2), 159-174.
- Surowiecki, J. (2004). *The wisdom of crowds: Why the many are smarter than the few and*

- Schultz, E., Christen, M., Voget-Kleschin, L., Burger, P. (2013). A sustainability-fitting interpretation of the capability approach: Integrating the natural dimension by employing feedback-loops. *Journal of Human Development and Capabilities*, 14(1), 115–133.
- Tasaki, T., Kameyama, Y., Hashimoto, S., Moriguchi, Y. and Harasawa, H., (2010), A survey of national sustainable development indicators, *Int. J. Sustainable Development* 13 (4): 337–361
- UNDP. (2005). Human development report 2005: International cooperation at a crossroads: aid, trade and security in an unequal world. New York: Hoechstetter Printing Co.
- UNDP. (2011). Human development report (2011): Sustainability and equity: A better future for all. Palgrave MacMillan, Basingstoke.
- Warschauer M. (2003), Technology and social inclusion. Rethinking the digital divide, MIT Press, Boston.
- Westerlund, Joakim, (2007), Testing for error correction in panel data”, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 2007, 69: 709-748.
- Woolgar S and K.Grint (1991), « Computers and the transformation of social analysis », *Science, technology and human values*, vol. 16, n° 3, pp.368-378.
- Yousefi, A. (2011), The impact of information and communication technology on economic growth: Evidence from developed and developing countries. *Econ. Innov. New Technol.* 2011, 20, 581–596.
- Zimmermann, B. (2006). Pragmatism and the capability approach. *Challenges in social theory and empirical research. European Journal of Social Theory*, n°9 (4), 467-484.

Annexes

Tableau 1: Nouvelles utilisations des TIC

Types	Utilisations
Smart grid	Déploiement de compteurs intelligents et de technologies de communication dans les réseaux électriques.
Smart work	Utiliser Internet pour travailler à distance et éviter les déplacements physiques.
Bâtiments intelligents	Des capteurs et de systèmes de contrôle dans les bâtiments pour améliorer l'efficacité.
Appareils intelligents	Des appareils pour améliorer l'efficacité et adapter leur utilisation aux besoins.
Transport intelligent	Des capteurs avancés et de solutions omniprésentes de communications pour diminuer la pollution
Industrie intelligente	Des logiciels pour prévoir, simuler et analyser la consommation d'énergie dans le processus de production
Solutions renouvelables intégrées	Utilisation d'outils de simulation pour le déploiement des énergies renouvelables
Planification de la ville intelligente	Déploiement d'un logiciel de simulation pour améliorer la conception urbaine et optimiser l'efficacité de l'énergie.

Source : Construction personnelle

Tableau 2 : Classement des pays selon l'IDHS

Pays	IDHS	IDH	IDH-IDHS	Par rapport à la moyenne	Groupe
Algérie	0,614	0,71	0,096	0,032	G2
Angola	0,527	0,498	-0,029	-0,055	G1
Bahreïn	0,69	0,803	0,113	0,108	G2
Bénin	0,439	0,463	0,024	-0,143	G1
Cameroun	0,543	0,497	-0,046	-0,039	G1
Cote d'Ivoire	0,48	0,435	-0,045	-0,102	G1
Égypte	0,531	0,655	0,124	-0,051	G1
Ghana	0,548	0,538	-0,01	-0,034	G1
Iran	0,569	0,739	0,17	-0,013	G1
Jordanie	0,592	0,726	0,134	0,01	G2
Kuwait	0,693	0,792	0,099	0,111	G2
Maroc	0,56	0,604	0,044	-0,022	G1
Nigeria	0,498	0,486	-0,012	-0,084	G1
Oman	0,695	0,774	0,079	0,113	G2
Qatar	0,745	0,834	0,089	0,163	G2
Sénégal	0,486	0,446	-0,04	-0,096	G1
Afrique du Sud	0,49	0,646	0,156	-0,092	G1
Tunisie	0,629	0,701	0,072	0,047	G2
Turquie	0,736	0,724	-0,012	0,154	G2

Source : calcul de l'auteur

Conformément à la construction de l'IDH, la somme des valeurs de pondération est égale à l'unité, ce qui permet de déduire l'IDHS d'une moyenne arithmétique simple de ses quatre dimensions. La méthodologie adoptée ici est finalement très proche de celle de l'IDH standard.

Tableau 3 : Classement des pays selon l'indice TIC

	TIC	Par rapport à la moyenne
Algérie	0,86	-0,01
Angola	0,81	-0,06
Bahreïn	0,98	0,11
Bénin	0,85	-0,02
Cameroun	0,92	0,05
Cote d'Ivoire	0,95	0,08
Égypte	0,82	-0,05
Ghana	0,88	0,01
Iran	0,87	0,00
Jordanie	0,92	0,05
Kuwait	0,89	0,02
Maroc	0,88	0,01
Nigeria	0,74	-0,13
Oman	0,86	-0,01
Qatar	0,91	0,04
Sénégal	0,84	-0,03
Afrique du Sud	0,93	0,06
Tunisie	0,80	-0,07
Turquie	0,90	0,03

Source : Calcul de l'auteur

Tableau 4 : Statistiques descriptives

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
IDHS	342	.5828106	.0959559	.423159	.8152232
Info-densité=TIC	342	.8744098	.3348803	.0167193	1.79269
Taux d'ouverture	342	.7669343	.3010729	.2072252	1.918778
hdi	342	.6357632	.1355652	.38	.856

Tableau 5 : Tests de racine unitaire en panel

Statistiques	Test de racine unitaire en panel					
	Levinlin		IPS		Fisher	
	Coefficients	p-value	Coefficients	p-value	Chi2	p-value
IDHS	-2,91	0,001	0,786	0,784	93,94	0,000
DIDHS	-15,46	0,000	-13,15	0,000		
TIC	1,73	0,607	-2,43	0,0074	116,53	0,000
DTIC	-8,07	0,065	-5,43	0,000		

D=opérateur de différence première

Tableau6: Test de cointégration de Westerlind (2007)

Test de cointégration de Westerlind (2007)		
IDHS-TIC		
Statistiques	Coefficients	p-value
Gt	-2,64	0,068
Ga	-4,79	1
Pt	-8,61	0,753
Pa	-5,36	0,994

Tableau 7 : Test de causalité de Hurlin et Dumitrescu (2012) (les variables qui causent sont sur les colonnes de la première ligne)

Test de causalité					
Variable dépendante		Lags	IDHS	Lags	TIC
IDHS	Tous les pays			1	8,169*** (0,000)
	Groupe1			1	5,181*** (0,000)
	Groupe2			1	6,675*** (0,000)
TIC	Tous les pays	1	1,315 (0,188)		
	Groupe1	1	0,116 (0,907)		
	Groupe2	1	2,043** (0,027)		

Notes : (.) les probabilités p-value *, **, *** significativité à 10%, 5%, 1%

Tableau 8 : Résultat du test de causalité de Granger

	Panel tout entier			Groupe 1			Groupe 2		
	Chi2	df	p-value	Chi2	df	p-value	Chi2	df	p-value
IDHS									
TIC	51,977	1	0,000	35,366	1	0,000	7,99	1	0,005
Tous	51,977	1	0,000	35,366	1	0,000	7,99	1	0,005
TIC									
IDHS	0,975	1	0,324	2,048	1	0,152	15,379	1	0,000
Tous	0,975	1	0,324	2,048	1	0,152	15,379	1	0,000

Tableau 9 : Résultats d'estimation du modèle VAR

	(1)	(2)	(3)
	Panel tout entier	Groupe 1	Groupe 2
IDHS			
IDHS(-1)	0,453***	0,335***	0,554***
TIC(-1)	0,043***	0,043***	0,045***
Taux d'ouverture	0,029***	0,021*	0,013
TIC			
IDHS(-1)	-0,566	-1,87	0,719***
TIC(-1)	0,980***	1,07***	0,791***
Taux d'ouverture	0,139	0,344**	0,069*
N	285	180	105
Q(b)	0,164	0,168	0,282

*, **, *** significativité à 10%, 5%, 1%