



**HAL**  
open science

# Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une approche interdisciplinaire : application cartographique de l IPE et étude de discours dans l'État de Chihuahua (Mexique)

Marie Wurtz

## ► To cite this version:

Marie Wurtz. Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une approche interdisciplinaire : application cartographique de l IPE et étude de discours dans l'État de Chihuahua (Mexique). Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II; Centro de investigacion en materiales avanzados (Chihuahua, Mexique), 2019. Français. NNT : 2019TOU20002 . tel-02503863

**HAL Id: tel-02503863**

**<https://theses.hal.science/tel-02503863>**

Submitted on 10 Mar 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.



# THÈSE

## En vue de l'obtention du **DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Cotutelle internationale : Centro de Investigacion en Materiales Avanzados,  
S.C.

---

Présentée et soutenue par

**Marie WURTZ**

Le 1 février 2019

**Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en  
eau par une approche interdisciplinaire : application  
cartographique de l'IPE et étude de discours dans l'Etat  
de Chihuahua (Mexique)**

---

Ecole doctorale : **TESC - Temps, Espaces, Sociétés, Cultures**

Spécialité : **Environnement et sociétés**

Unité de recherche :  
**GEODE - Géographie de l'Environnement**

Thèse dirigée par  
**Martin PAEGELow et Maria Teresa ALARCON HERRERA**

Jury

Mme Anne Honnegger, Rapporteur  
M. Víctor Manuel Reyes Gómez, Rapporteur  
Mme Elisabeth Huber-Sannwald, Examineur  
Mme Alexandra Angélie Descamps, Examineur  
M. Martin PAEGELow, Directeur de thèse  
Mme María Teresa Alarcón Herrera Alarcón Herrera, Co-directeur de thèse



**Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une  
approche interdisciplinaire : application cartographique de l'IPE et  
étude de discours dans l'Etat de Chihuahua (Mexique)**





CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**Diagnóstico de la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua con  
un enfoque interdisciplinario: aplicación cartográfica del IPA y  
estudio de discursos en el estado de Chihuahua, México**

Tesis que como requisito para obtener el grado de Doctorado en Ciencia y Tecnología  
Ambiental

Presenta:

**Marie Adeline Julia Wurtz**

Directores:

**Dra. María Teresa Alarcón Herrera**

**Dr. Martin Paegelow**

CHIHUAHUA, CHIH.

Febrero, 2019



## Remerciements

Je ne citerai pas de noms ici, les gens concernés sont trop nombreux, ceux qui liront ce texte se reconnaîtront tous et sauront recevoir les remerciements qui gonflent aujourd'hui mon cœur.

Merci à mes directeur-rices et à mes encadrant-e-s pour leur patience et leur confiance : vous m'avez donné la chance de réaliser ce travail dans des conditions qui nous ont certes surpris vous et moi, mais qui ont finalement aboutis à un résultat que je suis fière de publier à vos côtés aujourd'hui.

Merci à mes collègues ainsi qu'aux mentors qui m'ont accompagnée et épaulée à des moments décisifs pour ce travail mais aussi d'un point de vue plus personnel, ils et elles ne se liront et ne se reconnaîtraient malheureusement pas tous dans ces pages que j'ai noircies de gris au cours des années passées.

Merci aussi à toutes celles et ceux qui m'ont accompagnée sur le terrain : avec vos musiques, vos sourires, et toutes vos confidences et vos conseils... vous avez pris bien plus soin de moi que ce que je le faisais moi-même. Je vous en suis immensément reconnaissante.

Je remercie avec enthousiasme mes camarades de galère, sans doute les plus fidèles compagnons de ce doctorat : étudiant-e-s et ex-étudiant-e-s de tous niveaux, chômeurs, apprenti-e-s professeur-e-s et chargés de cours, secrétaires et technicien-ne-s, vigiles, femmes et hommes de ménage, chauffeurs, j'en passe et des meilleur-e-s ! Sans vous, les défis du quotidien auraient été des boulets à mes pieds. Merci de les avoir allégés par vos rires et vos bons mots.

Merci enfin à toute ma famille, ainsi qu'à mes ami-e-s d'ici et d'ailleurs, et merci à celui qui sera bientôt mon époux (s'il ne change pas d'avis !) : je ne saisis ici qu'une occasion de plus de vous dire ce que vous savez déjà, je vous aime.

A vous tous, merci pour cette intense expérience de vie dont une page se tourne aujourd'hui.



## Résumé

Les épisodes de sécheresse, les prélèvements et les pollutions de l'eau sont de plus en plus intenses dans le Nord du Mexique; où aridité, production agricole et conjoncture transfrontalière font de la gestion de cette ressource une problématique importante. En lien avec des dynamiques climatiques et socio-économiques, les variations hydriques affectent les sociétés aux niveaux sanitaires, économiques, environnementales etc. L'étude des pénuries en eau aborde conjointement ces différents facteurs afin d'élaborer des diagnostics synthétiques aidant les prises de décision. Dès lors il s'agit d'établir - dans l'objectif d'outils d'aide à la décision - des périmètres d'action pour réduire l'exposition des populations, mais aussi de considérer les fragilités sociosystémiques ainsi que les capacités d'adaptation qui rendent les populations plus ou moins vulnérables. L'approche adoptée dépasse les cadres disciplinaires et croise les échelles d'analyse. L'Indice de Pauvreté en Eau (IPE) utilisé dans ce travail ouvre des perspectives dans ce sens. Mais la place conférée aux dimensions hydrologiques et environnementales dans ses applications statistiques pose question. Pour cette étude, l'indice est calculé à partir d'outils et de données (publiques) cartographiques dans l'Etat de Chihuahua, afin de rendre visibles les pénuries en eau contrastées de ce territoire. Trois scénarios d'Evaluations Multicritères expérimentés adaptent sous TerrSet, les échelles de calcul, la normalisation des indicateurs et la compensation entre les différents facteurs de l'IPE. Les résultats s'avèrent pertinents : ils indiquent des pénuries socio-économiques dans la Sierra de Chihuahua, des pénuries hydrologiques dans le désert, et une surexploitation des aquifères dans les corridors de développement situés à l'interface de ces deux ensembles. Les cartes d'IPE sont d'autant plus pertinentes qu'elles insistent aussi sur la marginalité des milieux ruraux et l'importance de la gestion de l'eau agricole. Ce diagnostic d'exposition est complété par une analyse qualitative des discours dans la région agricole de Delicias. L'étude des relations existant dans le socio-écosystème précise le diagnostic de l'IPE : des clivages identifiés dans le système d'acteur expliquent la vulnérabilité du territoire face aux dégradations anthropiques de la ressource.

## Abstract

Periods of drought, water consumption and pollution are increasing and alarming especially in Northern Mexico, where aridity, agricultural production and cross-border conjuncture make water resources management crucial. Associated with socio-economic dynamics, hydric variations affect societies at many levels (sanitary, economic, ecologic...). Water scarcity studies address these different factors in synthetic diagnostics that help decision-making. The matter is to define action perimeters in order to reduce population exposure, but also consider sociosystem fragilities as well as adaptation capacities which increase or reduce the population vulnerability to water scarcities. Then analysis must go beyond disciplinary frameworks and one-scale analyzes. In this process Water Poverty Index (WPI) is interesting even if the place granted to hydrological and environmental factors in its statistical applications are questioned. WPI is calculated using cartographical tools and (public) data in the State of Chihuahua to make visible contrasted water scarcities. Three Multi-Criteria Evaluations alternatives are applied through TerrSet software adapting WPI scale calculation, indicator normalization and factor compensation. The maps obtained are interesting since they reveal socio-economic shortages in Chihuahuas' Mountains, hydrological shortages in the desert territories, and massive aquifer overexploitation in the development corridors located at the interface of these two geographical entities. Indeed WPI maps also insist on rural marginalization and importance of agricultural water management. This exposure diagnostic is completed by a discourse qualitative approach in the agricultural region of Delicias. Analyzing local relations allow specifying the cartographical diagnostic: cleavages are dividing the sociosystem and explain the vulnerability to human degradation of the resource of the territory.



## Resumen

Los eventos de sequía, usos y contaminación entrópica del agua se intensifican en el Norte de México, donde el manejo del agua es una problemática importante por la conjunción de factores geográficos, físicos, económicos y sociales como son: la aridez, producción agrícola y coyuntura fronteriza. Las variaciones en la cantidad y calidad del recurso (asociadas a dinámicas climáticas y socio-económicas) afectan las sociedades a varios niveles: sanitario, económico, ambiental, etc. Estudios de la escasez en agua consideran de manera conjunta numerosas variables ambientales y sociales con el fin de elaborar diagnósticos que puedan ayudar la toma de decisiones en estos temas. Estos diagnósticos sirven para establecer perímetros de acción para reducir la exposición de la sociedad. También es importante considerar las fragilidades sociales e institucionales y sus capacidades de adaptación frente a la escasez en agua, ya que dichos factores determinan la vulnerabilidad de la población. Con este fin, la presente investigación va más allá de las divisiones disciplinarias y combina las escalas empleadas para calcular y determinar el Índice de Pobreza en Agua (IPA). Este índice ofrece un enfoque interdisciplinario particularmente interesante, pero sus aplicaciones estadísticas limitan la visibilidad de las dimensiones hidrológicas y ambientales del problema. En vista de esta limitación, se propone una nueva metodología de cálculo del IPA a partir de herramientas y datos (públicos) cartográficos en el Estado de Chihuahua. La meta es resaltar las diferentes formas de escasez en agua de este territorio contrastado. Se consideran tres escenarios de *Evaluación Multicriterio* con el programa TerrSet para adaptar las escalas de cálculo, la normalización de los indicadores y la compensación entre los diferentes factores del IPA. Los mapas obtenidos de esta forma, resaltan la escasez socio-económica en la Sierra de Chihuahua, escasez hídrica en el desierto y sobreexplotación de acuíferos en los corredores de desarrollo (ubicados en el centro del Estado). Estos resultados marcan la marginalidad de los territorios rurales y la importancia del manejo adecuado del agua agrícola. En la región agrícola de Delicias, se complementa este diagnóstico de exposición con un análisis cualitativo de discursos. Al analizar las relaciones existentes en el socio-ecosistema, el diagnóstico elaborado es aún más completo, resaltando rupturas sociales: las cuales explican parte de la vulnerabilidad territorial frente a la degradación antrópica del recurso hídrico.



## Liste des Sigles

ACP : Analyses en Composantes Principales

AMC : Analyses MultiCritères

AWPI : Agricultural Water Poverty Index (Indice de Pauvreté en Eau Agricole)

CEH : Centre d'Ecologie et Hydrologie

CIMAV: Centro de Investigación en Materiales AVanzados (Centre de Recherche en Matériaux Avancés)

CONABIO : COMisión NAcional para el conocimiento y uso de la BIODiversidad (Commission Nationale pour la Connaissance et l'Usage de la Biodiversité)

CONAGUA : COMisión Nacional del Agua (Commission Nationale de l'Eau)

CONEVAL : CONsejo Nacional de EVALuación de la Política de Desarrollo Social (Conseil National d'Evaluation de la Politique de Développement Social)

DR : Distrito de Riego (District d'Irrigation)

DOF : Diario Oficial de la Federación (Journal Officiel de la Fédération)

EMC : Evaluation MultiCritère

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture)

ICA : Índice de Calidad del Agua (Indice de Qualité en Eau)

ICTPC : Ingreso Corriente Total Per Capita (Ressources financières courantes totales par habitants)

IDH : Indice de Développement Humain

INEGI : Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (Institut National de Statistiques et de Géographie)

INIFAP : Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Institut National de Recherches Forestière et Agricoles et de l'Elevage)

IPE : Indice de Pauvreté en Eau

IVC : Indice de Vulnérabilité Climatique

MDG : Millenium Development Goals (Objectif de Développement du Millénaire)

MOVE : Method for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe (Méthode pour l'amélioration des évaluations de vulnérabilité en Europe)

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OWA : Ordered Weighting Average (Moyenne Pondérée Ordonnée)

PBT : Producción Bruta Total (Production Totale Brute)

PIB : Produit Intérieur Brut

SAGARPA : Secretaría de la Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage, du Développement durable et de la Pêche)

SDG : Sustainable Development Goals (Objectifs de Développement Durable)

SIG : Système d'Information Géographique

SIH : Sub-Dirección de Infraestructuras Hidroagrícolas (Sous-direction d'Infrastructures Hydro-agricoles)

SIMBAD: Sistema Estatal y Municipal de Base de Datos (Système estatal et municipal de bases de données)

SINA : Sistema Nacional de Información del Agua (Système National d'Information de l'Eau)

SWPI : Simplified Water Poverty Index (Indice de pauvreté en eau simplifié)

SRL : Sociedades de Responsabilidad Limitada (Société de Responsabilité Limitée)

UACH: Universidad Autónoma de Chihuahua (Université Autonome de Chihuahua)

UAR: Unidad Ambiental de Referencia (Unité Environnementale de Référence)

UN : United Nation (Organisation des Nations Unies)

UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund (Fonds des Nations Unies pour l'Enfance)

UNTA: Unión Nacional de Trabajadores (Union Nationales des Travailleurs)

UR : Unidad de Riego (Unité d'Irrigation)

USV : Uso del suelo y vegetación (Usage des Sols et de la Végétation)

## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>DIAGNOSTICAR LA VULNERABILIDAD RELATIVA A LAS FALTAS DE AGUA POR UN ENFOQUE INTERDISCIPLINARIO :</b> |           |
| <b>APLICACIÓN CARTOGRAFICA DE L'ÍPE Y ESTUDIO DE DISCURSOS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA (MEXICO) .....</b> | <b>1</b>  |
| <b>RÉSUMÉ .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>LISTE DES SIGLES.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>RESUMEN EXTENSO EN ESPAÑOL: .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>LISTA DE MAPAS .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>LISTA DE ILUSTRACIONES.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>..... INTRODUCCIÓN</b>   |           |
| <b>.....</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1 MARCO TEÓRICO .....   | 7         |
| 1.2 ANTECEDENTES .....  | 12        |
| 1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....  | 21        |
| 1.4 ZONAS DE INVESTIGACIÓN .....  | 22        |
| <b>..... MATERIALES Y METODOLOGÍA</b>   |           |
| <b>.....</b>  | <b>29</b> |
| 2.1 DATOS DISPONIBLES Y SELECCIÓN DE LOS INDICADORES DEL IPA .....                                      | 29        |
| 2.2 ESTANDARIZACIÓN DE LOS INDICADORES MEDIANTE LA OPERACIÓN "FUZZY" DEL MÉTODO EMC .....               | 32        |
| 2.3 PONDERACIÓN E INTEGRACIÓN DEL IPA MEDIANTE LAS FASES DE CÁLCULO DEL EMC.....                        | 36        |
| 2.4 ANÁLISIS CUALITATIVOS .....   | 38        |
| 2.5 POBLACIÓN DE ESTUDIO Y COLECTA DE DISCURSOS.....  | 39        |
| 2.6 ANÁLISIS DE LOS DISCURSOS.....  | 43        |
| <b>..... RESULTADOS</b>   |           |
| <b>.....</b>  | <b>46</b> |
| 3.1 RESULTADOS DEL IPA-POR-MUNICIPIO (ESCENARIO 1) .....  | 46        |
| 3.2 RESULTADOS DEL IPA-LOCAL (ESCENARIO 2) .....  | 47        |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 3.3   | RESULTADOS DEL IPA-OWA (ESCENARIO 3) .....   | 48         |
| 3.4   | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SOCIAL EN LA REGIÓN DE DELICIAS.....   | 50         |
| 3.5   | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN LA REGIÓN DE DELICIAS, INCLUYENDO EL IPA Y EL ANÁLISIS AFFOM .....  | 56         |
| ..... <b>DISCUSIONES</b>  |  |            |
| .....   |  | <b>61</b>  |
| 4.1   | DISCUSIÓN DE LOS APORTES DEL IPA-SIG .....   | 61         |
| 4.2   | DISCUSIÓN DE LA MODELIZACIÓN DEL IPA-SIG .....   | 63         |
| 4.3   | DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOCIAL Y DIAGNÓSTICO INTERDISCIPLINARIO DE VULNERABILIDAD ASOCIADA A LA ESCASEZ EN AGUA EN LA SUBREGIÓN DE DELICIAS ..... | 66         |
| ..... <b>CONCLUSIONES</b>   |  |            |
| .....   |  | <b>71</b>  |
| <b>THESE EN FRANÇAIS :</b> .....  |  | <b>74</b>  |
| <b>DIAGNOSTIQUER LA VULNERABILITE RELATIVE AUX PENURIES EN EAU PAR UNE APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE :</b>                    |  |            |
| <b>APPLICATION CARTOGRAPHIQUE DE L'IPE ET ETUDE DE DISCOURS DANS L'ETAT DE CHIHUAHUA (MEXIQUE) .....</b>                    |  | <b>74</b>  |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>  |  | <b>75</b>  |
| ..... <b><u>PARTIE 1 : DIAGNOSTICS DES VULNÉRABILITÉS LIÉES AUX PÉNURIES EN EAU : DÉFINITIONS ET OUTILS</u></b>             |  |            |
| .....   |  | <b>82</b>  |
| 1.1   | VULNÉRABILITÉS ET PÉNURIES EN EAU : DÉFINITIONS ET APPLICATIONS POUR L'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION .....   | 83         |
| 1.2   | OPPORTUNITÉS DE L'IPE POUR DIAGNOSTIQUER LES PÉNURIES EN EAU .....   | 108        |
| 1.3   | LIMITES ET ENJEUX ACTUELS DE LA CONSTRUCTION D'UN INDICE TEL QUE L'IPE AUX ÉCHELLES RÉGIONALES ET NATIONALES .....   | 124        |
| 1.4   | CALCULER UN IPE-SIG ET LE COMPLÉTER PAR UNE ANALYSE DE DISCOURS DANS LE CADRE D'UN DIAGNOSTIC DE VULNÉRABILITÉ .....   | 145        |
| CONCLUSIONS PARTIELLES .....  |  | 172        |
| ... <b><u>PARTIE 2 : APPROCHES CROISÉES DE LA VULNÉRABILITÉ ASSOCIÉE AUX PÉNURIES EN EAU DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA :</u></b> |  |            |
| <b><u>CARTOGRAPHIER LA PAUVRETÉ EN EAU ET ANALYSER LES DISCOURS D'ACTEURS .....</u></b>                                     |  | <b>175</b> |
| 2.1   | DES DÉGRADATIONS DE LA RESSOURCE À LA PÉNURIE EN EAU : VULNÉRABILITÉ, USAGES ET GESTION DE L'EAU DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA<br>176                                   |            |
| 2.2   | DONNÉES DISPONIBLES POUR LA CONSTRUCTION DE L'IPE AU MEXIQUE : LA COLLECTE ENTRE ABONDANCES ET CARENCES.....   | 192        |
| 2.3   | ANALYSE DES DONNÉES UTILISÉES POUR ÉVALUER LA PAUVRETÉ EN EAU SUR LE TERRITOIRE MEXICAIN : ÉLABORER LES INDICATEURS DE L'IPE<br>210                                |            |
| 2.4   | EVALUATION MULTICRITÈRE (ÉTAPE PAR ÉTAPE) ET MODÉLISATION .....  | 236        |
| 2.5   | ANALYSER LES DISCOURS D'ACTEURS : LES OPPORTUNITÉS DES MÉTHODES QUALITATIVES POUR PRÉCISER L'ANALYSE DES VULNÉRABILITÉS<br>SOCIALES .....                          | 257        |

|   |            |
|---|------------|
| CONCLUSIONS PARTIELLES .....  | 277        |
| <b>.. PARTIE 3 : DIAGNOSTICS DE VULNÉRABILITÉ DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA, RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DE DU CALCUL DE L'IPE-SIG ET DE L'ANALYSE DES DISCOURS D'ACTEURS.....</b>    | <b>282</b> |
| o CARTES D'INDICATEURS NORMALISÉS GRÂCE AUX OUTILS SIG (CARTES RASTER ET « FUZZY ») .....   | 283        |
| 3.2 APPLICATION MUNICIPALE DE L'IPE-SIG DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA .....  | 337        |
| 3.3 MODÉLISATION DE L'IPE DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA : TIRER PARTI DES ALTERNATIVES SIG ET EMC.....   | 356        |
| 3.4 DIAGNOSTICS DE VULNÉRABILITÉ DANS LES MUNICIPALITÉS AGRICOLES DE LA SOUS-RÉGION DE DELICIAS : RÉSULTATS OBTENUS EN COMPLÉTANT L'IPE-SIG PAR UNE ANALYSE DES DISCOURS..... | 376        |
| CONCLUSIONS PARTIELLES .....  | 404        |
| <b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....</b>   | <b>408</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>   | <b>416</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>  | <b>442</b> |
| ANNEXE 1 : CARTE DE CHIHUAHUA.....  | 443        |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>   | <b>444</b> |
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>  | <b>445</b> |
| <b>LISTE DES CARTES .....</b>   | <b>445</b> |
| <b>LISTE DES PHOTOS .....</b>   | <b>447</b> |
| <b>TABLE DE MATIÈRES .....</b>  | <b>449</b> |

## **PRÉFACE**

*Je ne suis pas experte, mais je ne veux pas laisser passer cette occasion pour exprimer mon ressenti face au travail effectué par une étudiante « DOCTORANTE », auquel j'ai assisté pendant six mois pleins. Et je peux dire que durant cette période, ma petite fille Marie WURTZ, a travaillé avec acharnement pour avancer sa thèse et finir le long cycle de ses études.*

*Déjà enfant et adolescente elle était raisonnable et studieuse. Après le Baccalauréat, elle a suivi une formation de préparation aux grandes écoles, en hypokhâgnes et khâgnes, au lycée Masséna à Nice. Elle y a parfait son apprentissage des sciences sociales et des langues. Cela l'a conduite ensuite à partir pour l'Université de Toulouse, réputée pour le perfectionnement de l'espagnol et l'étude des civilisations de l'Amérique latine.*

*Pour compléter encore son savoir elle a participé au programme Erasmus pour la licence : départ en Espagne, à Oviedo, où elle a entre autre perfectionné sa connaissance de la langue et des cultures hispanophones. Enfin, en master, elle est partie au Mexique, où elle a décidé de prolonger ses études par une thèse sur l'environnement et l'impact de celui-ci sur la société de ce grand pays.*

*Et voilà que du mois de novembre 2017 au mois de juin 2018, nous avons vécu mon époux et moi au rythme de cette doctorante en phase de rédaction. Par période, par curiosité, nous lui posions des questions sur l'avancée de son travail. Alors, débutaient des conversations intéressantes sur les recherches qu'elle avait menées antérieurement à l'écriture. Nous avons compris l'importance des analyses effectuées, l'énergie dépensée, et le travail investi pour déterminer les lieux et les sujets d'étude.*

*Par ailleurs, nous avons constaté l'importance des travaux réalisés sur le terrain, afin d'avoir une idée précise de la situation actuelle de l'eau à Chihuahua, et d'essayer de trouver des solutions appropriées. La cartographie complétée par les recherches locales, permet de cerner les problèmes locaux et de préciser, selon la situation, « zone urbaine ou rurale », les stratégies à prévoir pour augmenter l'efficacité de la gestion.*

*Il serait souhaitable que cette étude soit relayée et permette de prendre des décisions adéquates : elle apporterait une aide précieuse à la mise en place de solutions importantes.*

*Maryse Saralle*



# Prologue

Je m'étais inscrite en thèse avec des objectifs de formation relativement clairs :

- apprendre la gestion de projet, qui me semble être un atout dans tous les milieux professionnels ;
- me familiariser avec la cartographie, moi qui ai surtout fait de l'analyse d'entretien dans mon parcours d'études (plus ou moins géographiques) ;
- et m'aguerrir aux pratiques de la communication et de la rédaction.

Je me suis alors lancée dans une thèse sur la construction d'indicateur et l'analyse des discours pour le diagnostic de vulnérabilité au Mexique.

Faire une thèse interdisciplinaire, qui réunirait dans un comité des chimistes, des géographes, des sociologues, et par la suite des écologues, c'était un projet ambitieux. Ajoutez à cela que la thèse était construite dans le cadre d'une co-tutelle franco-mexicaine, et se donnait comme terrain de recherche deux états du Mexique rarement rapprochés : Chihuahua et Puebla. Tout un programme, n'est-ce pas ? Au niveau scientifique je savais que le challenge était au rdv, mais je n'avais pas réalisé à quel point ça l'était aussi au niveau humain.

J'avais lu que la thèse était une expérience pleine de rencontres mais aussi de solitude. Plusieurs personnes m'avaient prévenue avant même l'inscription. Et un fois doctorante, les conseils ont remplacé les avertissements. Mais ce n'est que face au vide que j'ai compris : dans mon expérience, faire une thèse c'est se mettre face au vide, se sentir seul-e et perdu-e au milieu des discours, des assurances et des certitudes des autres. Pour en sortir (avec le sourire) il faut démonter ses doutes, reconnaître ses forces, et améliorer sans cesse sa capacité de communication : des apprentissages dignes des guerriers de la lumière !

Après avoir traversé des pertes difficiles, et connu plusieurs défaites face au désarroi, je suis sortie grandie de cette expérience de vie, peuplée aussi de son lot de rencontres, collègues, amitiés et découvertes. Dans ce flot, cinq rencontres ont été bouleversantes :

- Je me suis trouvée moi-même (c'est dans la solitude que cette rencontre inespérée est la plus probable) ;
- J'ai fait deux rencontres qui m'accompagneront dans ce qui suit je l'espère (la musique et un homme tout à la fois musicien et chercheur) ;
- J'ai découvert différents outils SMART !, parmi lesquels le plus formidable de tous est la communication non violente ;
- Et pour finir j'ai découvert le métier de chercheur... car être doctorant n'est pas continuer ses études (contrairement aux apparences) c'est se retrouver apprenti chercheur.

Autour de ce métier planent de nombreux doutes et de nombreuses incompréhensions : Les chercheurs sont-ils des savants ? Des fous ? Des génies ? Des illuminés ? Trouvent-ils ce qu'ils



cherchent ? Le savent-ils seulement ? Et alors, où placer les doctorants ? Des naïfs ou bien des froussards ?

« A mon avis ils feraient mieux de se trouver un vrai job... parce qu'un doctorat, franchement, ça sert à quoi ? »

Je remercie aujourd'hui de tout mon cœur les quelques courageux, collègues et amis, esprits rigoureux et pleins de bon sens (Frédérique, Victor, Éric, Hugues et les équipes d'organisation des doctorales) pour les bribes de réponses qu'ils m'ont apporté à ces questions. Merci aussi à Julien Prud'homme et Yves Gingras : leur texte que j'ai découvert sur le tard parle des enjeux « diplomatiques » de l'interdisciplinarité notamment et, des paradoxes qu'elle présente pour les jeunes chercheurs (l'entreprise est longue et difficilement validée par des pères qui restent dans leur propre discipline, or justement, le cadre du doctorat implique des délais stricts et suppose la validation par ses pères).

Les discours de tous ces gens m'ont permis de savourer (oui, je pèse mes mots), de savourer la phase ultime de la thèse et de la recherche : l'écriture. C'est à cette phase d'après moi que se doivent la majeure partie des incompréhensions associées à la recherche :

- « Qu'est-ce qu'ils fabriquent dans leurs bureaux ?
- Ils écrivent...
- Des poètes mal inspirés...
- Euh... pas exactement...
- En tout cas, ça ne les aide pas à parler. Tu les as déjà entendus ? Ne vas pas me dire que ces gens ont les pieds sur terre...
- ...
- Et puis je vais te dire, depuis les bureaux, la critique est facile. »

Sur le terrain, on voit à peu près ce que font les chercheurs : ils mesurent (mais eux seuls savent quoi), et quand ils ne mesurent pas, ils posent des questions souvent surprenantes (et parfois même dérangeantes). Mais ce qu'ils en font après... il n'y a (presque) qu'eux qui le savent. C'est ce que plusieurs de mes interlocuteurs m'ont confié aux cours des sorties de terrains effectués pendant le doctorat. Ne nous y trompons pas, la frustration est grande face au manque de réponse et aux *jargons* inaccessibles des chercheurs.

Le jargon et l'écriture font partie du métier. L'écrit aide à mettre les idées au clair, et dans ce cadre les mots doivent être soigneusement choisis et définis. Ce n'est pas une phase absolument nécessaire à la réflexion, mais l'écriture fait partie des attentes incontournables de la recherche subventionnée (cela semble d'ailleurs la moindre des choses). Mais pour laisser une trace derrière soi, il existe des contreparties importantes :

- il s'agit d'écrire sur des idées « en vogue », et en employant le « jargon scientifique » ;
- de plus, il faut combattre les idées reçues, et faire émerger au moins quelques nuances inédites.

Pour cela, chercheurs et doctorants remettent sans relâche... le métier à l'ouvrage. Voilà qui n'est déjà pas mal. Mais pour lever une partie des doutes concernant leurs travaux et les rendre vraiment utiles, il faudrait ensuite traduire ces résultats d'experts dans des formats plus

accessibles (présentations orales et textes de divulgation). C'est là une condition *sine qua none* d'échange avec le reste de la société. D'ailleurs de nombreux chercheurs franchissent le cap en s'investissant dans des associations. Et pendant ce temps, d'autres vont plutôt s'occuper de leur famille (ce n'est pas moi qui leur jeterai la pierre...).

En fait, on trouve tous les profils de personnes parmi les chercheurs (et comme j'ai pu en faire l'expérience, un même chercheur change aussi de profil au cours de sa plus ou moins longue carrière). Finalement, comme tous les membres d'une société, les chercheurs sont faits à la fois d'envies, de volontés, de savoirs-faire, de manques, de peurs et de peines ; et les plus chanceux exercent avec leurs moyens une activité qui leur permet de vivre.



**Resumen extenso en español:**

**Diagnóstico de la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua con un enfoque interdisciplinario: aplicación cartográfica del IPA y estudio de discursos en el estado de Chihuahua, México**

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Coincidencia de las componentes del IPA y de la vulnerabilidad.....                    | 11 |
| Tabla 2: Componentes del IPA (Sullivan, 2002).....  | 12 |
| Tabla 3: Indicadores empleados para el cálculo del IPA.....                                     | 30 |
| Tabla 4: Valores numéricas aplicadas en el indicador de acceso al riego.....                    | 34 |
| Tabla 5: Valores empleados para estandarizar los indicadores.....                               | 34 |
| Tabla 6: Estrategias OWA, ejemplo de compensación para cinco factores.....                      | 37 |
| Tabla 7: Discursos colectados.....  | 41 |
| Tabla 8: Líneas directivas y términos empleados para realizar las entrevistas comprensivas..... | 42 |
| Tabla 9: Síntesis AFFOM de la vulnerabilidad social asociada a la escasez en agua.....          | 58 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Enfoque MOVE de la vulnerabilidad y el manejo de riesgos (inspirado de Birkmann et al. (2013)).....                      | 9  |
| Figura 2: Estrategias OWA (Paegelow, 2018).....  | 18 |
| Figura 3: Componentes (azul) y herramientas (naranja) empleadas para analizar la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua..... | 22 |
| Figura 4: Función lineal.....  | 33 |
| Figura 5: Función Sigmoidal.....   | 33 |
| Figura 6: Función J-Shaped.....  | 33 |
| Figura 7: Unidades territoriales consideradas para realizar mapas de indicadores de capacidad, uso y acceso.....                   | 37 |
| Figura 8: Sistema de actores de la gestión del agua en Chihuahua.....  | 40 |
| Figura 9: Esquema “actancial” (elaborado a partir de Van Campenhoudt, 2011).....   | 44 |

## LISTA DE MAPAS

|   |    |
|---|----|
| Mapa 1: Uso de suelo y vegetación (USV) en Chihuahua.....   | 23 |
| Mapa 2: Las tres entidades del estado de Chihuahua .....  | 24 |
| Mapa 3: Región de Delicias (Zona de estudio).....   | 26 |
| Mapa 4: IPA-por-municipio, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 1 con delimitaciones municipales. .... | 46 |
| Mapa 5: IPA-local, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 2 con delimitaciones municipales. ....         | 48 |
| Mapa 6: IPA-OWA, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 3 con delimitaciones municipales. ..             | 49 |
| Mapa 7: IPA-local en la sub-región de Delicias .....  | 57 |
| Mapa 8: Sustracción del IPA-por-municipio por el IPA-local .....  | 64 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: El agua extraída de este pequeño pozo genera dudas en cuanto a la sobreexplotación de los acuíferos ..... | 52 |
| Ilustración 2: « Relación de usuarios beneficiados con la relocalización del pozo oficial n°87 » .....                   | 53 |
| Ilustración 3: Local de una JR de la zona de estudio .....   | 54 |
| Ilustración 4: Conferencia de apertura del evento expo/agro y foro del agua en Chihuahua (2016) .....                    | 55 |

## Introducción

El monitoreo de la variación en la calidad y cantidad del agua tanto como el acceso a este recurso vital, son temas de alta prioridad en la actualidad tanto económica como ambiental y social, debido al impacto que tienen dos procesos globales en la disponibilidad del recurso (United Nations, 2017; UNSG, 2016). Primero, los modelos de desarrollo que se están implementando en gran parte de los continentes analizan el crecimiento de la población mundial con respecto al agua consumida. En este aspecto, es de notar que la población mundial se cuadruplicó entre los años 1900 y 2000, pasando de 1'500 mil millones a 6 mil millones (Gleick, 2000). Para alimentar en agua y comida esta cantidad de gente, las extracciones de agua fueron multiplicadas por 7 en 100 años y el total de hectáreas cultivadas bajo riego pasaron de ser 50 millones a 267 millones en este mismo periodo. De tal manera que el manejo del agua se establece hoy en día como un tema de primera importancia.

Además, este crecimiento poblacional tiene lugar en un contexto en que las demandas son mayores y muy distintas a las de los siglos y milenios pasados. Se está concentrando la población en áreas urbanas por la variedad y accesibilidad de sus infraestructuras, lo cual es significativo en sí y va de la mano con modos de consumo que suponen una intensificación de los sistemas productivos. Estas dinámicas tienen amplias repercusiones en el recurso hídrico: las actividades antropogénicas promovidas en la actualidad por una parte aceleran el cambio climático, y por otra crean desequilibrios específicos tales como el agotamiento de las reservas de aguas subterráneas o la acumulación de residuos y contaminantes en las reservas hídricas tanto superficiales como subterráneas (Blanchon, 2013).

El segundo proceso que está perturbando los equilibrios hídricos milenarios en los que se fundamentaron y establecieron los socio-sistemas actuales concierne las evidencias del cambio climático, las cuales conllevaron a la creación en 1988 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) cuyo fin es monitorear las evoluciones climáticas y ecológicas globales. Se ha marcado que la repartición del agua en el sistema planetario, y en particular la frecuencia, intensidad y localización de las precipitaciones están cambiando rápidamente (IPCC, 2014). Estas variaciones que conciernen el agua meteorológica conllevan también modificaciones notables de las redes hidrográficas: en otros términos, el cambio climático impacta las dos fuentes de agua que suelen ser las más accesibles para el hombre. Eso dificulta las previsiones y pone en tela de juicio las prácticas actuales, más aún porque estos cambios intervienen en un contexto de clímax demográfico post-industrial. El resultado de estas dinámicas es que el agua dulce, que solía ser considerada como un recurso renovable, ha pasado a ser un recurso potencialmente

renovable. De modo que la falta de calidad y cantidad de agua está generando problemas sanitarios y sociales en varias partes del mundo (Bied-Charreton, Makkaoui, Petit, & Requier-Desjardins, 2006).

En México, los recursos hídricos están afectados tanto a nivel cuantitativo como a nivel cualitativo. En este país los problemas de escasez en agua, fueron señalados desde el inicio de los años 2000 y se mencionan como prioritarios en el plan nacional hídrico 2014-2018, el cual hace referencia a una “brecha hídrica” entre oferta y demanda (CONAGUA, 2014). En este documento también se señala que la demanda agrícola representa un 80% de la demanda total actual, el 63% siendo de este recurso de origen superficial, a pesar de que las aguas de subterráneas disminuyen a una velocidad de 6,5 mil hm<sup>3</sup>/año. En este contexto, las autoridades públicas llaman la atención respecto al problema de sobreexplotación de las aguas subterráneas y sus consecuencias ecológicas. Además de estos problemas cuantitativos cabe señalar que en 2002 la mitad de la población mexicana vivía en regiones contaminadas por “las descargas industriales y urbanas, pero también las derivadas de la agricultura, que acarrea plaguicidas, insecticidas y fertilizantes químicos” (Avila Garcia, 2005).

Estos problemas de escasez en agua son todavía más notables en las zonas intertropicales áridas y semiáridas del norte de México, las cuales están afectadas primero por el cambio climático (alteraciones del ciclo del agua y las reservas hidrológicas), y luego por la degradación o la intensificación de la degradación de la calidad de los acuíferos (en particular por la presencia de fluoruro y arsénico en una gran parte del territorio mexicano). Desde el final del siglo 20 el Estado de Chihuahua padeció de recurrentes sequías cuyos impactos en la reproducción socio-económica de la población fue fuerte. En cuanto a la degradación de los acuíferos, el tema es más sensible aun, puesto que incrementa la contaminación de los recursos hídricos y genera riesgos sanitarios<sup>1</sup>. Es importante remarcar que el Estado de Chihuahua contribuye de manera muy relevante en la producción agrícola nacional, e influye en las relaciones internacionales, como Estado fronterizo con Estados Unidos y siendo parte del Tratado Internacional de Límites y Aguas (TILA).

---

<sup>1</sup> Ver <http://archivo.eluniversal.com.mx/cultura/65668.html>, 16 juin 2011 ou Vidsupra vol 3, n°2, 2011 EFECTOS A LA SALUD POR LA INGESTA CRÓNICA DE ARSÉNICO EN AGUA. MARCADORES RAPD, HERRAMIENTA PARA LA DISCRIMINACIÓN ESPECÍFICA EN EL GÉNERO ZEA. Norma Almaraz-Abarca, Diana María Rivera-Rodríguez<sup>1</sup>, Jesús Sánchez- González<sup>2</sup>, Amanda Delgado-Alvarado, Luis Gerardo Barriada-Bernal, Alfonso Reyes-Martínez<sup>1</sup>, José Roberto Medina-Medrano<sup>1</sup>, José Antonio Ávila-Reyes, José Natividad Uribe-Soto, Jesús Herrera-Corral<sup>1</sup>, Néstor Naranjo-Jiménez.



Ante éstas amenazas, la comunidad científica analiza tanto las dinámicas hidrológicas y ambientales como su gestión por parte de la sociedad, con el fin de que ésta pueda integrar soluciones a las problemáticas hídricas y sociales correspondientes. Con lo que el presente trabajo forma parte de esta línea de investigación, e integra análisis técnicos y sociales para enfocarse de manera específica en el estudio de los diagnósticos de vulnerabilidad asociados a la escasez en agua en el Estado de Chihuahua.

## 1.1 Marco teórico

### 1.1.1 *Monitorear la escasez en agua*

La presencia de amenazas sanitarias y medioambientales es atribuida entre diferentes factores al aumento de períodos de sequía, y al uso entrópico del agua. Afectan tanto a la cantidad como la calidad del recurso. Esto trae como consecuencia el surgimiento de conflictos debidos a las competencias entre varias actividades y territorios para acceder al agua (Angélie-Descamps et Alarcón-Herrera, 2015). En esa coyuntura a la vez tensa y compleja, se destacan distintas formas en la vulnerabilidad ligada con el recurso agua. Existen alternativas técnicas para tratar y gestionar el agua y reducir las carencias. Sin embargo, el desarrollo de las infraestructuras correspondientes es lento, costoso y difícil. En estos aspectos también resulta de primera importancia el estudio del marco socio-cultural en el cual se quiere reducir los problemas señalados previamente. Organismos internacionales tales como la Organización de Naciones Unidas (UN de acuerdo a sus siglas en inglés) OMS/UNICEF (2017) y UNSG, (2016)mencionan estas dinámicas como temas prioritarios insistiendo en particular:

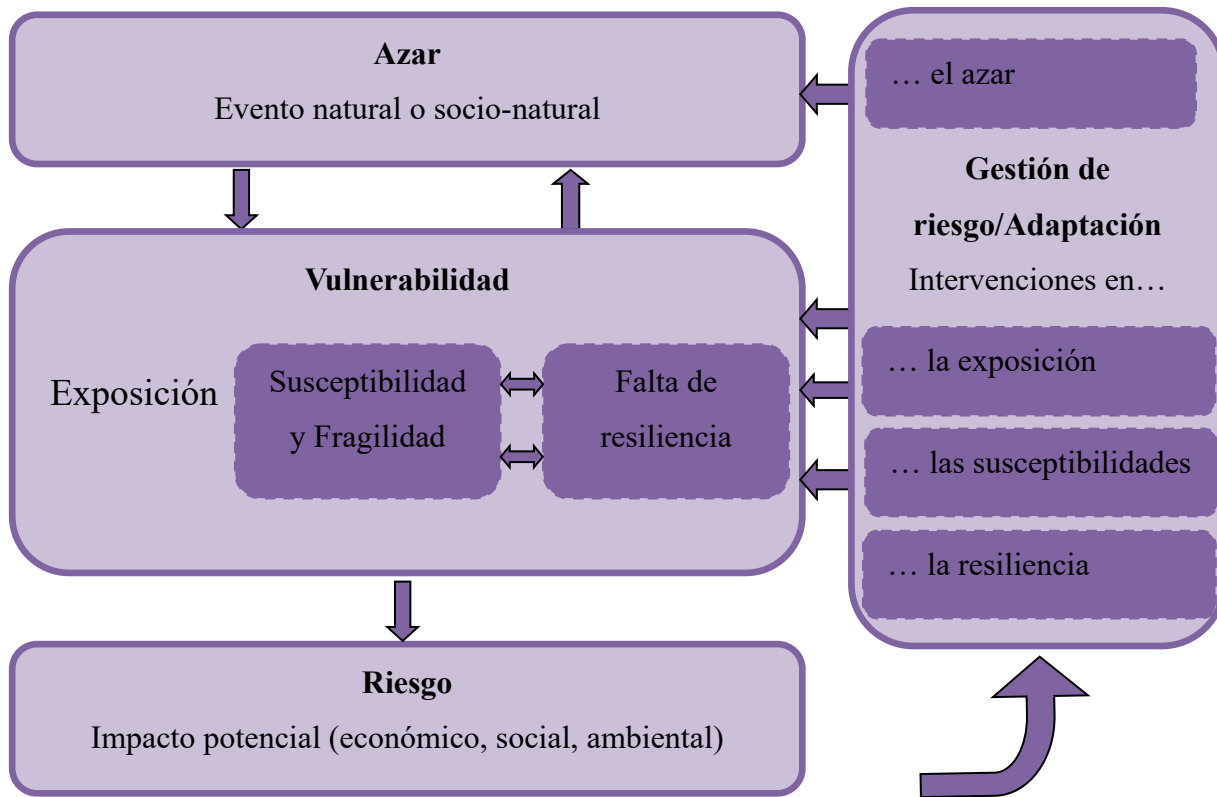
- ✓ El acceso al agua de bebida, y a la higiene elemental;
- ✓ El acceso al saneamiento;
- ✓ La racionalización del manejo y uso del agua;
- ✓ Problemáticas ambientales asociados al cambio climático y la contaminación hídrica.

En este contexto, ciertas áreas de investigación tienen entre sus objetivos, el realizar diagnósticos operativos, o sea que puedan ser útiles para la toma de decisiones para reducir la escasez en agua definida de acuerdo a la FAO como: *“el punto en el cual las repercusiones de todos los usuarios tienen un efecto perjudicial en el aprovisionamiento y/o la calidad del agua en el marco de las disposiciones institucionales vigentes, a tal punto que la demanda de todos los sectores, entre los cuales se encuentra el ambiente, no pueden ser totalmente satisfechas”* (Winpenny, 1997 in FAO, 2012). Esta definición

plantea el carácter multidimensional de la escasez en agua (para mayor detalle, ver sección 1.1.1, versión en extenso). La pobreza, entendida como una carencia de capacidades y capitales (o sea también de manera multidimensional) constituye una causa de escasez en agua Seckler et al. (1998) y Ohlsson et Turton (1999). Este tema también se encuentra en el centro de preocupaciones internacionales: el primer objetivo del desarrollo sostenible consiste en eliminar la pobreza, y el cuarto objetivo busca promover la educación considerada como un capital humano importante, mientras que el objetivo 6 se enfoca en el acceso universal al agua segura para todos. (UNSG, 2016). Junto con la pobreza es de notar que el objetivo 16 se enfoca en la promoción de la paz, la justicia y la fuerza institucional, las cuales tienen impactos relevantes en temas de escasez en agua (Sullivan, 2002).

### 1.1.2 *Estudiar la vulnerabilidad de manera operativa*

Birkmann et al. (2013) definen la vulnerabilidad como la « *propensión de un elemento expuesto siendo o bienes físicos o capitales, o seres humanos y sus medios de subsistencia, para ser herido o dañado en el momento en que les impactaría un evento peligroso aislado o compuesto* ». Cabe señalar que esta definición reciente es amplia (incluso se podría decir compleja) y sirve para abarcar la gran diversidad que caracteriza los estudios de vulnerabilidad: “*en los últimos años se han encontrado, aunque con distintos grados de sistematización teórica, trabajos sobre vulnerabilidad social, psicosocial, jurídica, política, cultural, demográfica, entre otros*” (Busso, 2001). En este marco, por su fuerte impacto en las sociedades, el análisis de vulnerabilidad asociada a eventos naturales o socio-naturales peligrosos (llamados “azares” por Birkmann et al. (2013)) se estableció como un tema de investigación importante. Frente a los azares socio-naturales (como es la escasez en agua), la vulnerabilidad depende de sistemas complejos e implica un análisis “plural y multi-escalas” (Becerra, 2012). Las reflexiones al respecto trascienden las fronteras disciplinarias y generan interrogaciones epistemológicas (para mayor detalle, ver secciones 1.1.2 y 1.1.3). Birkmann et al. (2013) propusieron por lo tanto una síntesis interdisciplinaria llamada *Method for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe* (MOVE). (Figura 1).



**Figura 1: Enfoque MOVE de la vulnerabilidad y el manejo de riesgos (inspirado de Birkmann et al. (2013))**

MOVE no es el primer trabajo de definición interdisciplinaria de la vulnerabilidad asociada a azares socio-naturales (Adger, 2006 ; Becerra, 2012 ; Reghezza, 2006 ; Shirley, et al., 2003 ; Turner et al., 2003). La literatura especializada solía distinguir dos dimensiones de vulnerabilidad, llamados factores claves de acuerdo al enfoque MOVE. El primer factor clave suele ser “biofísico” o “extrínseco” según los autores, y corresponde a la “exposición” de MOVE (Becerra, 2012 ; Reghezza, 2006 ; Shirley et al., 2003). Por lo contrario, el segundo factor clave se dice “social” o “intrínseco”. En la perspectiva MOVE está dividido en dos partes cuyas interacciones se resaltan por flechas, de manera que los factores claves “falta de resiliencia” y “susceptibilidad y fragilidades” se distinguen del factor de exposición. Este enfoque basado en tres factores claves de vulnerabilidad, uno físico y dos sociales, se había desarrollado anteriormente a MOVE sin embargo el vocabulario empleado para aludir a estos factores era diverso (Becerra, 2012 ; Sturma, 2013). Ciertos autores aludían a la “vulnerabilidad inicial”, otros a “fragilidades socio-económicas” y otros a “susceptibilidades”, haciendo referencia a lo que MOVE llama “fragilidad y susceptibilidades”. En cuanto al tercer factor clave de vulnerabilidad podía ser “vulnerabilidad secundaria”, “resiliencia”, “adaptación”, o “capacidades de respuesta”. MOVE usa y

distingue tres de estos conceptos. Primero, la resiliencia se define como la facultad para “tratar con una perturbación” , y depende de tres niveles de capacidad: « *anticípate capacidad para anticipar*», « *capacidad para afrontar*» et « *capacidad de recuperación* » (Birkmann et al., 2013). De aquí que, la adaptación interviene en el marco de la gestión del riesgo, y se traduce en acciones enfocadas hacia los tres factores claves de vulnerabilidad y hacia los azares: “*mientras que las capacidades de afrontamiento y la resiliencia están vinculadas principalmente a las capacidades que ayudan a mantener el estado actual de los sistemas bajo estrés, la adaptación como concepto implica acciones dirigidas a hacer un cambio más profundo en las relaciones socioecológicas*” (Birkmann et al., 2013). Dicho de otra manera, la resiliencia alude a la gestión del azar en sí, mientras la adaptación se enfoca en procesos de transformaciones más diversos y largos.

MOVE permite clarificar y asociar las diversas definiciones y marcos analíticos de la vulnerabilidad frente a azares naturales y socio-naturales, y se usa por lo tanto en la presente investigación. En esta perspectiva, la fase de diagnóstico resulta a la vez central y complicada, y varía según el azar considerado (Becerra, 2012; Birkmann et al., 2013).

### 1.1.3 *Elaborar diagnósticos de vulnerabilidad asociados a la escasez del agua*

Como fue señalado anteriormente, existe un interés tanto político como científico para reducir la vulnerabilidad de la sociedad frente a la escasez en agua. En este marco se requiere elaborar diagnósticos interdisciplinarios para ayudar la toma de decisiones relativas al manejo del recurso. La literatura especializada señala que el enfoque interdisciplinario es exigente (Prud’homme et Gingras 2015). Eso explica en parte porque: “*En calidad de eurística, el trabajo MOVE es una herramienta de reflexión [pero éste] no propone un método espectívico de monitoreo (cualitativos o cuantitativo) ni predefine una lista de indicadores*” (Birkmann et al., 2013). Sin embargo, enfrentar estos retos es importante hoy en día para que los diagnósticos puedan ser útiles en la toma de decisiones (IMTA, 2010).

En la actualidad, para comprender los retos de los análisis interdisciplinarios se desarrollan índices, los cuales permiten comparar entre sí varias unidades que pueden ser territoriales, sociales, administrativas, económicas, ambientales, etc. (para mayor detalle, ver sección 1.1.3). Con este propósito se selecciona un conjunto de características que determinan la temática considerada, y se les aplica un tratamiento

estadístico estandarizado. En este proceso hace falta cuidar la relevancia de los indicadores seleccionados y la uniformización del tratamiento estadístico (Garriga & Foguet, 2010).

En el ámbito del manejo del agua, esto dio lugar a la elaboración de un Índice de Pobreza del Agua (IPA), el cual integra datos socio-económicos y eco-hidrológicos (Sullivan, 2002). De acuerdo al marco teórico presentado el estudio de la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua se realiza determinando la degradación del agua, las infraestructuras económicas y materiales que intervienen en la gestión del agua, y analizando la pobreza de manera multidimensional. Los 5 componentes del IPA sirven con ese fin (Tabla 3).

**Tabla 1: Coincidencia de las componentes del IPA y de la vulnerabilidad**

| Vulnerabilidad  | Componente IPA | Meta   |
|---|----------------|--|
| Exposición a degradaciones hídricas   | Recurso        | Evaluar la cantidad y calidad del agua                                   |
|   | Medio Ambiente | Evaluar el impacto ambiental de la gestión territorial                   |
| Exposición a la pobreza y falta de infraestructuras<br>Fragilidad y Susceptibilidad | Uso            | Evaluar los usos del agua  |
|   | Acceso         | Evaluar las infraestructuras materiales empleadas en la gestión del agua |
|   | Capacidad      | Evaluar la pobreza (de manera multidimensional)                          |

El IPA como índice se usa para clasificar los territorios o sociedades según su pobreza en agua y de esta manera determinar su vulnerabilidad relativa frente a la escasez en agua (para mayor detalle, ver sección 1.1.3 y 1.2). Pero el método de cálculo actual presenta carencias tanto en términos de relevancia como en términos de uniformización del diagnóstico. Además, en este índice, el análisis social resulta limitado: esta limitante es particularmente relevante por el carácter socio-natural de la escasez en agua. En este contexto, aunque la resiliencia tenga una relevancia más limitada que en el caso de otros azares claramente delimitados temporal y físicamente (las inundaciones por ejemplo), la capacidad de adaptación de la sociedad determina fundamentalmente la exposición (Birkmann et al., 2013; Daupras, 2015; Leone, 2007; Reghezza, 2006; Avila, 2003 ; Eakin, 2003; Magaña, et al., 2012). En este contexto, el presente estudio tiene como meta analizar de manera interdisciplinaria la vulnerabilidad vinculada con la escasez en agua aplicando el IPA y completándolo con métodos cartográficos y sociales.

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Cálculo del IPA

El Índice de Pobreza del Agua (IPA), concebido por Sullivan en 2002, está presentado como la síntesis de los conocimientos actuales relativos al hidro-socio-sistema. Para considerarlo en toda su complejidad, el IPA establece que la seguridad hídrica no sólo depende de la distribución espacial y temporal de los recursos en el territorio, sino que también depende de un conjunto de capital monetario, humano, físico y social (Sullivan , 2002). Este índice establece por lo tanto 5 componentes para integrar los aspectos sociales y técnicos de la gestión del agua. El siguiente cuadro presenta unos ejemplos de indicadores los cuales ayudan para vislumbrar el contenido y significado de cada componente (Tabla 2).

**Tabla 2: Componentes del IPA (Sullivan, 2002)**

| Componentes del índice de pobreza en agua |   |
|---|---|
| Recurso                                   | Disponibilidad de agua superficial y subterránea          |
|   | Variabilidad o confiabilidad de los recursos              |
|   | Precipitación media anual                                 |
|   | Volumen de agua aprovechado                               |
|   | Calidad del agua para riego agrícola                      |
|   | Calidad del agua para consumo humano                      |
| Medio ambiente                            | Productividad de plantas tratamiento y de potabilizadoras |
|   | Degradación de suelos                                     |
|   | Sobre-explotación de acuíferos                            |
|   | Volumen tratado de aguas residuales                       |
|   | Mamíferos y pájaros en peligro de extinción               |
|   | Pérdidas por cosechas                                     |
| Uso                                       | Uso agrícola  |
|   | Uso abastecimiento público                                |
|   | Uso industrial autoabastecida                             |
|   | Uso termoeléctricas                                       |
|   | Eficiencia en el consumo de agua                          |
| Acceso                                    | % Población con acceso a agua potable                     |
|   | % Población con acceso a servicios de saneamiento         |
|   | % de tierras agrícolas con acceso a riego                 |
|   | % de habitantes con ayudas y subsidios del gobierno       |
| Capacidad                                 | Ingresos económicos por familia                           |
|   | Nivel Educativo de la población                           |
|   | Esperanza de vida   |
|   | Tasa de mortalidad en menores de 5 años                   |
|   | % de habitantes con enfermedades de origen hídrico        |

|                             |
|-----------------------------|
| Conflictos por uso del agua |
|-----------------------------|

Como se nota en la tabla, el índice está conformado por: 2 componentes basados en análisis técnicos (estado del Recurso y Medio Ambiente); 2 componentes que integran análisis sociales (Acceso al agua y Capacidad de la población para cubrir sus necesidades); y un componente que recopila las cantidades de agua aprovechadas en los distintos sectores económicos y tiene que ver con ambas disciplinas (Uso que se da al recurso). Estos 5 componentes y el conjunto de información que abarcan (desde cantidad y calidad del recurso hasta características socio-económicas de la población) representan el fundamento del IPA.

Luego las series de indicadores analizados se presentan bajo formas medibles. Finalmente el cálculo se elabora mediante análisis multi-criterios (AMC), la cual soluciona el problema de la variedad de las unidades consideradas y de la diversidad de la información recopilada (Eastman et al., 1995 ; OECD et JRC, 2008). Esta conlleva 3 etapas: una interpretación inicial de los datos, su ponderación y su integración mediante tratamientos estadísticos (Jiang et Eastman, 2010). La estandarización de los indicadores consiste en una comparación de éstos datos entre sí, con la literatura específica u otros datos similares para determinar si representan niveles de pobreza en agua altos o bajos. Esto desemboca en unas series de valores que van del 0 al 1, dónde 0 representa el hidro-socio-sistema más desfavorable para el hombre y 1 el hidro-socio-sistema ideal. Posteriormente se ponderan los valores obtenidos y se aplican los promedios ponderados. Estos cálculos se efectúan para cada uno de los indicadores de una misma componente, de modo que se obtiene un valor para cada una.

Los resultados obtenidos de esta forma, sirven para establecer diagnósticos y comparaciones. Sin embargo, el cálculo del IPA acaba al sintetizarlos una vez más aplicando otro promedio ponderado que permite integrar entre sí todas las componentes. La fórmula inicial de Sullivan es (Sullivan, 2002):

$$\text{IPA} = \frac{R W_r + A W_a + C W_c + U W_u + M W_m}{W_r + W_a + W_c + W_u + W_m}$$

Dónde  $W_r$  es el coeficiente aplicado al resultado  $R$  obtenido para el componente recurso,  $W_a$  es el coeficiente aplicado al resultado  $A$  obtenido para el componente acceso,  $W_c$  es el coeficiente aplicado al resultado  $C$  obtenido para el componente capacidad,  $W_u$  es el coeficiente aplicado al resultado  $U$  obtenido para el componente uso y  $W_m$  es el coeficiente aplicado al resultado  $M$  obtenido para el componente medio ambiente.

En la mayoría de los estudios le atribuyen la misma ponderación a cada componente, tal y como lo propuso Sullivan. Estos autores lo llegan a veces a justificar a nivel epistemológico no sin señalarlo como una carencia debida a la falta de investigación al respecto (Sullivan, 2002; Li, 2011).

### 1.2.2 Límites del IPA

Al emprender el cálculo del IPA, es de notar que varios aspectos de la metodología de cálculo que se siguen debatiendo a la fecha, 19 años después de su proposición. Una de sus principales limitaciones reside en que: dependiendo de las escalas y territorios considerados los datos usados para su cálculo pueden variar mucho. Eso se debe en gran parte a que los datos disponibles en cuanto al hidrosistema son escasos y los datos asociados al socio-sistema varían según el territorio considerado (Abraham, Fusari, & Salomón, 2002; Abraham, Fusari, Soria, & Salomón, 2005). Por lo tanto, la selección de indicadores varía mucho de acuerdo al territorio considerado, siendo poco debatida por lo mismo esta temática. La uniformización del IPA y por ende su interés comparativo siguen siendo aplicados y también cuestionados (para mayor detalle, ver sección 1.2.3, 1.3.1 y 1.3.3).

El enfoque tradicionalmente empleado para normalizar los indicadores en el IPA es el enfoque min/max. En este método, ciertos indicadores se elaboran de tal manera que son “ auto-normalizados” “self-normalized”: es el caso de las tasas como por ejemplo los accesos a servicios de agua y alcantarillado, la mortalidad al nacer, etc. (Manandhar, Pandey, & Kazama, 2012). Para estos indicadores, solo falta definir el sentido de la jerarquización. Al contrario, para los otros indicadores, es necesario definir cuáles son las condiciones óptimas y mínimas del indicador. Con este fin, o se comparan los datos entre sí o se comparan con los umbrales preexistentes. En la actualidad, existen pocos antecedentes respecto a los umbrales fijos necesarios para calcular el IPA. Con lo que la mayoría de los indicadores se calculan en base a los máximas y mínimas observados en el muestreo (Manandhar et al., 2012)<sup>2</sup>. Este método resulta específico a los datos considerados “*data specific*”, lo cual limita las posibilidades de comparación y discusión (Fenwick, 2010; Mlote, Sullivan, & Meigh, 2002)

También se discute la relevancia del IPA por el hecho de que existen correlaciones entre sus componentes (Heidecke, 2006). Y luego, se llegaron a observar correlaciones fuertes entre el IPA y los

---

<sup>2</sup> Los ~~unios~~únicos umbrales fijos que existen conciernen el uso de agua para consumo doméstico.



niveles de desarrollo económico y social (Rentería Flores & Pérez Arredondo, 2010). De tal manera que el IPA da resultados muy parecidos a los que se obtiene calculando el índice de desarrollo humano (IDH), lo cual pone en tela de juicio su validez por una parte (puesto que la pobreza en agua no solamente depende del nivel de factores socio-económicos) y reduce el interés de su elaboración por otra (Garriga & Foguet, 2010). Esto cuestiona los logros del índice en cuanto a su meta interdisciplinaria (para mayor detalle, ver sección 1.3.2)

Por fin, el IPA ha sido cuestionado respecto a su capacidad para reflejar la heterogeneidad de los territorios estudiados (Abraham, et al. 2002; Fenwick, 2010; Mlote et al., 2002). Esto remite a la crítica dirigida hacia los índices en general, en términos de relatividad y simplificación de la realidad (OECD & JRC, 2008). En el contexto del manejo hídrico genera preguntas particulares respecto a la visibilidad de las zonas rurales, y agrícolas en el IPA. En las Metas de Desarrollo Sustentable, n°2 y 12, las Naciones Unidas señalan retos respectivamente asociados a la infraestructura agrícola, pero también a la contaminación agrícola (United Nations, 2017; UNSG, 2016). Consecutivamente, los estudios incluyendo indicadores de riesgo o contaminación agrícola en el IPA se multiplican en la actualidad mucho más que anteriormente (Anju et al., 2017; Fenwick, 2010; Gong et al., 2017; Jemmali & Salah Matoussi, 2012). De manera paralela, el reporte de United Nations (2017) señala retos específicos asociados al desarrollo de capacidades e infraestructuras en ámbitos rurales (metas n°4 y 6), pero pocos estudios del IPA resaltan por distinguir estos dos contextos (Garriga & Foguet, 2010; Heidecke, 2006; Maheswari, Sandeep, & Chaithanya Sudha, 2017).

Finalmente, se cuestiona la relevancia del método de cálculo del IPA, dado que por su naturaleza promedia los resultados (Anju et al., 2017; Garriga & Foguet, 2010). En particular, Garriga & Foguet (2010a) demostraron que, al aplicar un promedio ponderado para agregar los componentes, los valores más bajos se nivelan bajo la influencia de los altos, y recíprocamente. Este fenómeno numérico llamado compensación, tiene como consecuencia que los resultados finales tienden a concentrarse alrededor del promedio (0.5). Ciertas operaciones estadísticas permiten reducir dicha compensación. Al reemplazar la operación aditiva por una operación multiplicativa en la fórmula del IPA (Garriga & Foguet (2010a), se tiene la expresión del IPAg, a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 2

$$\text{IPA} = R^{W_r} \times R^{W_a} \times C^{W_c} \times U^{W_u} \times M^{W_m}$$

Dónde  $W_r$  es el coeficiente aplicado al resultado obtenido para el componente recurso,  $W_a$  es el coeficiente aplicado al resultado obtenido para el componente acceso,  $W_c$  es el coeficiente aplicado al

resultado obtenido para el componente capacidad,  $W_u$  es el coeficiente aplicado al resultado obtenido para el componente uso y  $W_m$  es el coeficiente aplicado al resultado obtenido para el componente medio ambiente.

Al emplear potencias (en vez de las ponderaciones tradicionales), el IPAg refuerza, para cada componente, las diferencias existentes entre los valores altos y bajos. De esta manera el impacto de los valores extremos es más difícil de compensar en el IPAg que en el IPA. Además, usando una operación multiplicativa (en vez de aditiva), la fórmula de Garriga & Foguet (2010a) amplía el rango de resultados y los hace más sensibles a estos mismos valores. La asociación de estas dos estrategias estadísticas explica que la ecuación 2 da mayor visibilidad a los valores bajos que la ecuación 1. En el marco del Evaluación Multicriterio (EMC) aplicados mediante los SIG, existen otras alternativas de agregación las cuales también pueden otorgar mayor visibilidad a valores bajos (se define y detalla el EMC en la siguiente sección).

Respecto a estas limitaciones es de notar que su discusión es limitada por el hecho de que se elaboraron en base a diferentes datos: solo un autor, Van der Vyver (2012, 2013a, 2013b), debate las propuestas de Cho et al. (2010), y Garriga y Fourget (2010a, 2010b) al comparar los resultados obtenidos mediante varios métodos de cálculo del índice. En este contexto las propuestas se desarrollan sintetizando y comparando diferentes diagnósticos establecidos para un mismo territorio, lo cual genera avances en el debate científico y la negociación territorial en cuanto al manejo del agua. El presente estudio se inscribe en este marco: se aplican varias propuestas respecto a la construcción del IPA, y a la manera de Van der Vyver (2013) se discuten hasta determinar cuales permiten producir un diagnostico que resalte las diferencias territoriales. La reflexión se enfoca en la selección de los indicadores, pero también en el desarrollo de métodos de normalización e integración de los componentes e indicadores mediante tratamientos SIG. Es de notar que Cullis et O'Regan (2004) emplearon herramientas SIG para calcular el IPA, pero sin usar la llamada Evaluación Multi-Criterios como lo hace el presente trabajo (para mayor detalle, ver sección 1.4.2).

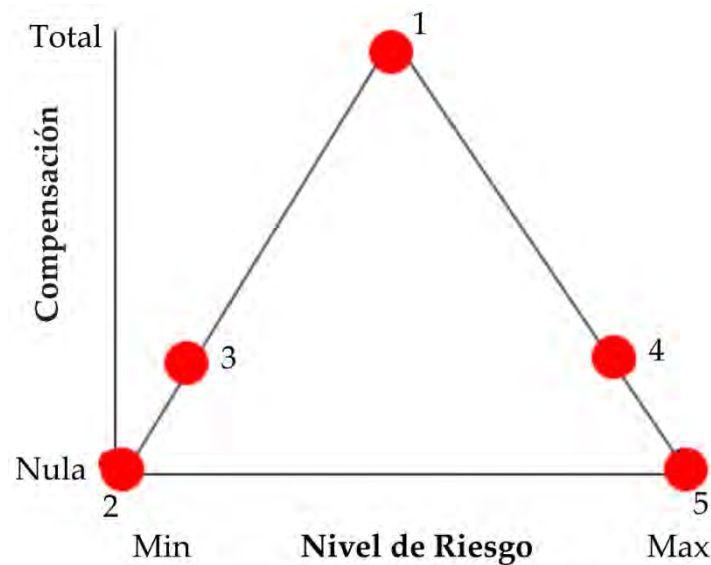
### 1.2.3 *Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multi-Criterios (EMC)*

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se suelen utilizar para ayudar en la toma de decisiones, elaborando modelos específicos a través de operaciones de AMC cartográficas (Yager, 1995; Jiang &

Eastman, 2010). Varios indicadores se integran mediante operaciones de normalización y agregación incluidas en el llamado Evaluación Multi-Criterios (EMC). Este método es criticado de manera similar al AMC empleado en el cálculo del IPA respecto a la relatividad de los resultados, y más aún respecto a su claridad. Sin embargo, los EMC ofrecen alternativas para calcular cartográficamente el índice, las cuales permiten distinguir áreas urbanas, agrícolas y rurales no agrícolas. Además, cuenta con alternativas de agregación interesantes, las cuales podrían servir en los debates mencionados por Garriga & Foguet (2010) respecto a los métodos de cálculo del IPA. De esta manera, las EMC ofrecen posibilidades adicionales respecto a la metodología de cálculo de dicho índice.

La EMC genera mapas de aptitudes considerando una multitud de criterios. Estos mapas clasifican los territorios de acuerdo a su aptitud) relativa, considerando uno o varios factores. De acuerdo a esta definición, pertenece a la familia de las AMC. Al implementarlas mediante el programa TerrSet (ex Idrisi) desde los años 90 (J. R. Eastman, Kyem, Toledano, & Weigen, 1993; Yager, 1988), la EMC distingue entre variables y factores limitantes. Los factores limitantes se determinan a través de un enfoque “Booleano” el cual indica si el territorio puede usarse o no: en los territorios donde el uso es posible el factor limitante no genera impacto; pero donde no puede usarse enmarcan el espacio. Las variables expresan la aptitud – continua – o al contrario, el nivel de riesgo que presenta el territorio considerado para el objetivo correspondiente. Cuando un indicador presenta aptitudes bajas, éstas señalan retos de manejo (también llamados problemáticas) relativos a dicho indicador. Para agregar los datos, la EMC define diferentes posibilidades de compensación: “La mayoría de las técnicas AMC suman las puntuaciones de las aptitudes ponderadas, y el usuario los promedia para obtener la aptitud final. Eso significa que la compensación es total: un territorio con una aptitud crítica para un factor importante sería compensado por otros factores presentando altas aptitudes en el mismo territorio. Otorgar una compensación total es arriesgado mientras que limitar el impacto de cada factor es prudente. La EMC ofrece la posibilidad de usar los llamados pesos de orden: se trata de una segunda serie de ponderación, la cual se añade a la ponderación tradicional y depende de las aptitudes específicamente observadas en cada unidad de cálculo. El número de peso de orden corresponde al número de factores y su suma es de 1. Contrariamente a las ponderaciones dependen de la unidad donde se calculan: para cada localización (pixel) los factores ponderados son ordenados desde el más bajo (izquierda) hasta lo más alto (derecha). Y el peso de orden está atribuido a cada posición de esta clasificación. Atribuir el mismo peso a todas las posiciones implica que la compensación sea libre (estrategia 1). Contrariamente, atribuir todo el peso al factor de izquierda (el más bajo para la unidad considerada), es prudente y significa que

no hay compensación (estrategia 2). Atribuyendo 100 % del peso al factor más alto (para la unidad), también quita toda compensación pero constituye la opción más arriesgada (estrategia 3). Las posibilidades existentes para asociar estos dos criterios diseñan el llamado espacio de decisión, con forma de triángulo. La asociación de diferentes niveles de compensación y riesgo permite moverse a lo largo de los lados de dicho triángulo. Este método llamado promedio ponderado ordenado (OWA por su sigla en inglés) permite diseñar diferentes mapas de aptitudes” (Paegelow, 2018). Figura 2, (adaptada de Eastman et al. 1993).



**Figura 2: Estrategias OWA (Paegelow, 2018).**

El método OWA de la EMC abre por lo tanto alternativas interesantes para el cálculo del IPA al adaptar la compensación seleccionando una estrategia específica respecto a la toma de decisiones. Y otra ventaja del EMC reside en el hecho de que se aplica en el marco de análisis cartográfico, operado a diferentes escalas. Con este fin, el programa TerrSet emplea mapas de tipo raster, aplicando los cálculos directamente a los píxeles incluidos en el mapa. A través de ello, las entidades administrativas se dividen en varias unidades de cálculo y pueden reflejar diferentes realidades territoriales. El resultado de ello, se acerca a la propuesta de Abraham, Fusari, & Salomón (2002) puesto que los píxeles pueden definirse de tal manera que los territorios que abarcan sean relativamente homogéneos desde los puntos de vista ambiental y socio-económico. Además, es de notar que el enfoque cartográfico permite valorar diferentes escalas de datos y genera resultados territorialmente específicos: identificando diferentes unidades territoriales de acuerdo a sus ubicaciones y formas geométricas. En consecuencia, si pre-

existen datos cartográficos, el uso de mapas raster permite simplificar la alternativa de Abraham, et al. (2002).

El presente estudio implementa el cálculo del IPA a través de mapas raster en el Estado de Chihuahua. Y con el fin de discutir el potencial del EMC valora diferentes alternativas de representación cartográfica y compensación enfocándose en aumentar la visibilidad de las problemáticas rurales (agrícolas y no agrícolas).

#### 1.2.4 *Análisis de la vulnerabilidad social*

En el marco de la presente investigación el IPA presenta otro limitante puesto que no analiza (casi) las interacciones sociales y estrategias específicamente adoptadas frente a la escasez en agua y tampoco trata las fragilidades institucionales y culturales cuya importancia es notificada por varios estudios (Birkmann et al., 2013; Becerra, 2012). Estas capacidades de adaptación y fragilidades impactan particularmente la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua puesto que el socio-sistema determina este azar socio-natural a la vez directa e indirectamente. Estos temas se suelen tratar por medio de análisis cualitativos de discursos (Blot et al., 2015; Daupras, 2015; Sturma, 2013). Estos enfoques se distinguen de las metodologías de construcción de los índices, y las completan al matizar los resultados de acuerdo a las coyunturas locales (Berthier, 2006 ; Kauffmann, 2011 ; Quivy et Van Campenhoudt, 1995). Por esta razón, MOVE insiste también en el interés conjunto de los enfoques cualitativos y cuantitativos para la elaboración de diagnósticos de vulnerabilidad multi-escalas (Birkmann et al., 2013). Además, el análisis de discursos presenta la ventaja de darles espacio a las representaciones no científicas lo cual es interesante en el marco de la ayuda a toma de decisiones (Prud'homme & Gingras, 2015).

Jodelet define la representación como “*una forma de conocimiento, socialmente elaborado y compartido con metas prácticas y contribuyendo a la construcción de una realidad común para una entidad social*” (Jodelet, in Abric, 1994). Este mismo autor señala que es a la vez “*el producto y el proceso de una actividad mental a través de la cual un individuo o un grupo reconstituye la realidad a la cual se está enfrentando y le atribuye un significado específico*” (Jodelet, in Abric, 1994). O sea que las representaciones le dan un sentido a los hechos y contribuye en definir perímetros de acción y justificar las estrategias de acción de los individuos y sociedades (Moscovici, 1961, 2003). En base a estas

definiciones el análisis de las representaciones es de los individuos o grupos de individuos resulta interesante para determinar sus capacidades de adaptación y fragilidades.

Una sociedad puede considerarse como un sistema puesto que está conformada por un conjunto de elementos interactuando entre sí (Donnadieu, et al., 2003 ; Durand, 1979). Personas físicas y morales interactúan entre sí para conformar el socio-sistema. Estas personas se suelen llamar actores dado el hecho de que se caracterizan por sus acciones, y las personas cuyo perímetro de acción se complementan conforman sistemas de actores (Crozier et Friedberg, 1977 ; Lemieux, 1991). También aparece que las acciones individuales entran en el marco de acciones colectivas llamadas prácticas de actores. En un sistema de actores, las representaciones (individuales y colectivas) se expresan y se encuentran a través de las prácticas de actores, las cuales transforman también las representaciones. Raffestin (2013) evidencio por fin que el poder de los actores y representaciones regulan las prácticas de los actores. El enfoque relacional considera tanto las representaciones, las prácticas y la regulación social que se expresan en los socio-ecosistemas (Blot, 2005).

El problema de los análisis cualitativos de discursos es que resulta poco compatible con la ayuda a la toma de decisiones (Becerra, 2012). Considerando esta limitación, se propone sintetizar el análisis social bajo la forma de un análisis de Fuerzas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (AFFOM por su sigla en francés). Este enfoque fue desarrollado para racionalizar las estrategias de acción en varias escalas y contextos (Baba, et al., 2018 ; Damaris et al., 2010 ; Jackson, et al., 2003). Estos análisis pueden ser útiles para delimitar perímetros de acción frente a la escasez en agua de acuerdo a la vulnerabilidad y capacidades de adaptación de los sistemas de actores. La relevancia de esta metodología es aún mayor considerando que se usa con frecuencia para elaborar diagnósticos en el ámbito de la producción agrícola (Carlos et Aguilar, 2014; Damaris et al., 2010; Produce, 2012; Reyes Vazquez et Urrea Lopez, 2016).

Considerando los problemas de escasez en agua en Chihuahua, la presente investigación elabora un diagnóstico interdisciplinario de esta vulnerabilidad asociando tres metodologías: la construcción de índices, la cartografía y el análisis social.

### 1.3 Hipótesis y objetivos de la investigación

#### 1.3.1 *Hipótesis*

**Con el fin de realizar un diagnóstico de vulnerabilidad, el método de cálculo de índices puede ser completado por herramientas provenientes de varias disciplinas.**

#### 1.3.2 *Objetivo general*

**El objetivo del estudio es realizar un diagnóstico de vulnerabilidad que permita la visualización de los problemas de escasez en agua, adaptando y completando el IPA mediante métodos cartográficos, y análisis social cualitativo.**

#### 1.3.3 *Objetivos particulares*

- 1) Adaptar la metodología del IPA construyendo los indicadores de recurso y ambiente de manera específica (cartográfica), con el fin de preservar su carácter interdisciplinario.
- 2) Construir el IPA aplicando la EMC para aumentar la visibilidad de los indicadores de recurso y ambiente en los resultados.
- 3) Integrar una metodología de cálculo del IPA que se pueda volver a aplicar (al menos en México) y cuyos resultados sean a la vez una síntesis representativa de la diversidad de los territorios considerados.
- 4) Modelar el IPA para fomentar la identificación de factores potencialmente problemáticos asociados a ámbitos agrícolas y rurales en los resultados.
- 5) Completar los resultados obtenidos con el IPA determinando la vulnerabilidad social asociada a los problemas de escasez en agua aplicando un análisis cualitativo de los discursos considerando la perspectiva de ayuda a la toma de decisiones.

Estos objetivos llevan a asociar métodos y enfoques a la vez diferentes y complementarios. Como se presenta en la Figura 3, esta asociación permite analizar de manera extensa y multidimensional la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua.

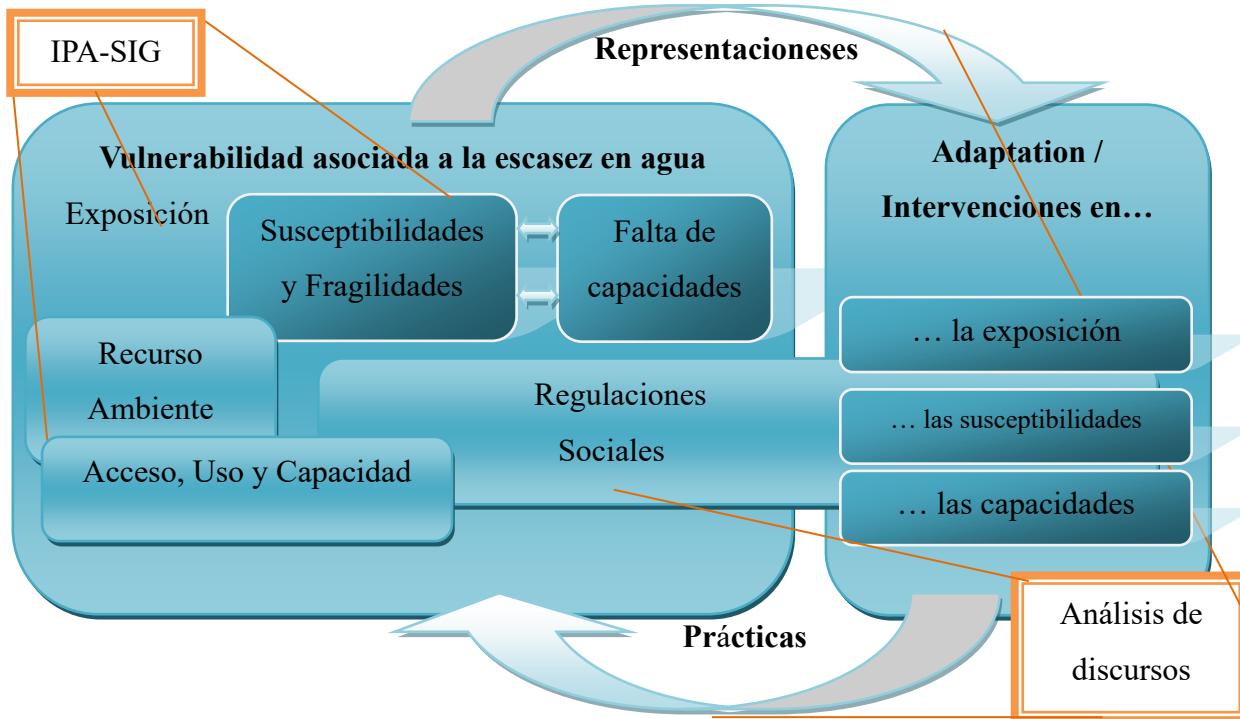


Figura 3: Componentes (azul) y herramientas (naranja) empleadas para analizar la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua

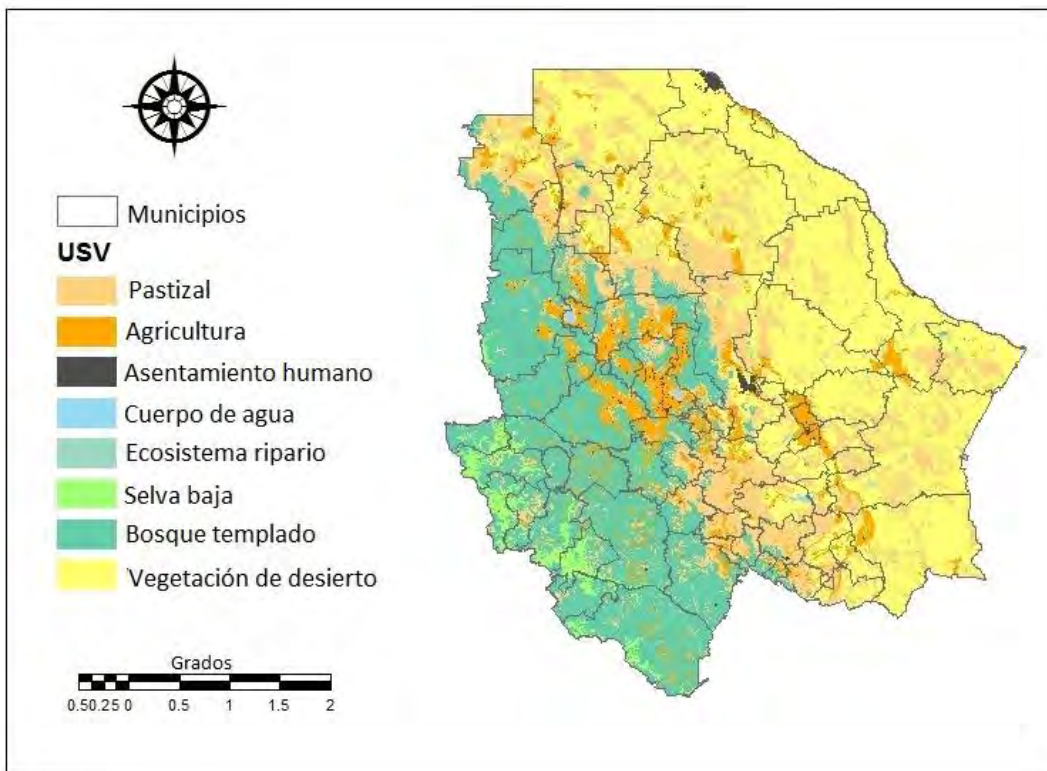
## 1.4 Zonas de investigación

Para realizar un diagnóstico de vulnerabilidad interdisciplinario se llevó a cabo la determinación del Índice de Pobreza en Agua (IPA) por una parte, y se realizaron encuestas sociales cualitativas por otra. Se contemplaron dos escalas de investigación para desarrollar el estudio en el Estado de Chihuahua a nivel estatal para el cálculo del IPA, y a nivel local para el análisis de la vulnerabilidad social mediante la observación de las relaciones sociales.

### 1.4.1 El estado de Chihuahua



El estado de Chihuahua situado al norte de México conjunta un contexto climático semiárido y una fuerte producción, con lo cual conjunta varios retos de gestión hídrica, y su vulnerabilidad climática llega a ser incrementada o reducida por las dinámicas de desarrollo de su territorio. Este territorio es agrícola y dispone de numerosas riquezas mineras. A escala nacional en el año 2013 tuvo el primer lugar respecto a la producción de: avena para forraje, algodón hueso, cebolla, alfalfa verde, manzana y nuez (INEGI, 2014).

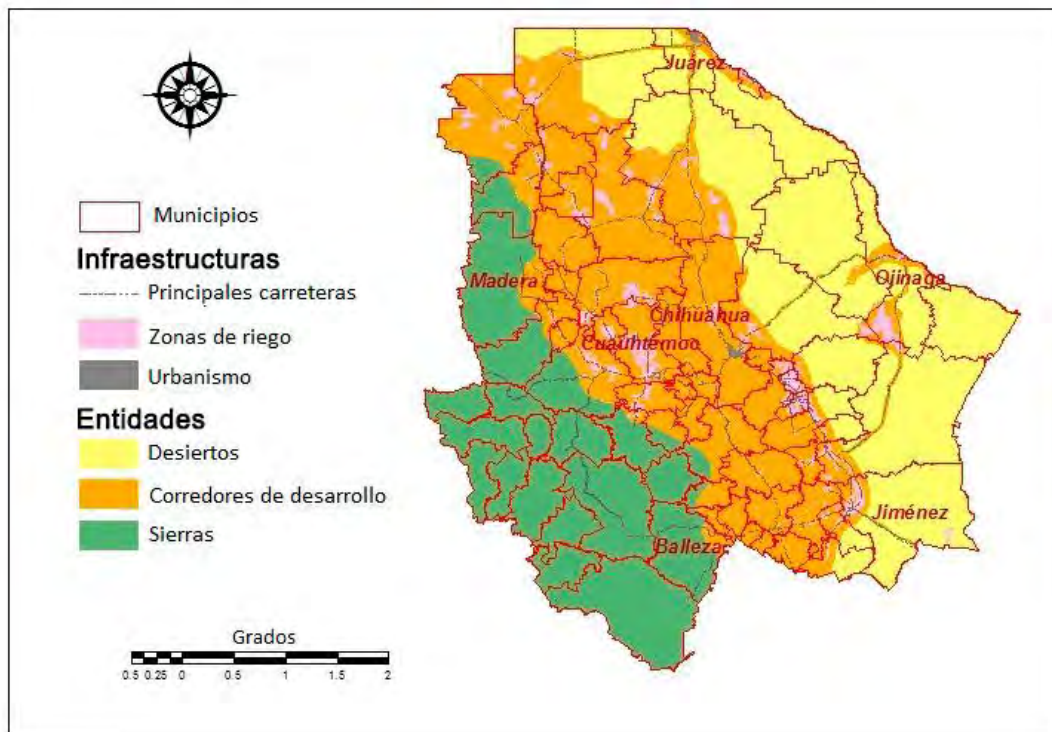


**Mapa 1: Uso de suelo y vegetación (USV) en Chihuahua**

La ciudad fronteriza de Cd. Juárez (rodeada de territorios agrícolas y mineros) es la ciudad más grande del Estado. También Ojinaga, Jiménez y el centro del territorio estatal (Chihuahua, Delicias y Cuauhtémoc) se caracterizan por altas concentraciones de actividades agrícolas y grandes ciudades (INEGI, 2014). La actividad minera, adquiere una dimensión estratégica en la región de Parral (Secretaría de Economía, 2016). En cambio, amplias extensiones de desierto se caracterizan por una presencia humana esporádica, y la Sierra chihuahuense (situada en el sur-este montañoso del Estado) por fuertes grados de marginalización (CONABIO, 2012). En este territorio las áreas urbanizadas no son de

tamaño poblacional relevantes (INEGI, 2013), y son escasas las degradaciones ambientales, tales como la sobreexplotación de los acuíferos observada en el centro del Estado (CONAGUA, 2018).

En suma, Chihuahua se caracteriza por tres problemáticas contrastantes: aridez en los desiertos, degradación ambiental en los polos de desarrollo y retos en cuanto al desarrollo de capacidades e infraestructuras en los espacios rurales (para mayor detalle, ver sección 2.1.1). Al aplicar el IPA en este territorio, se plantea que los resultados permitan identificar estos diferentes tipos de pobreza en agua (Mapa 2).



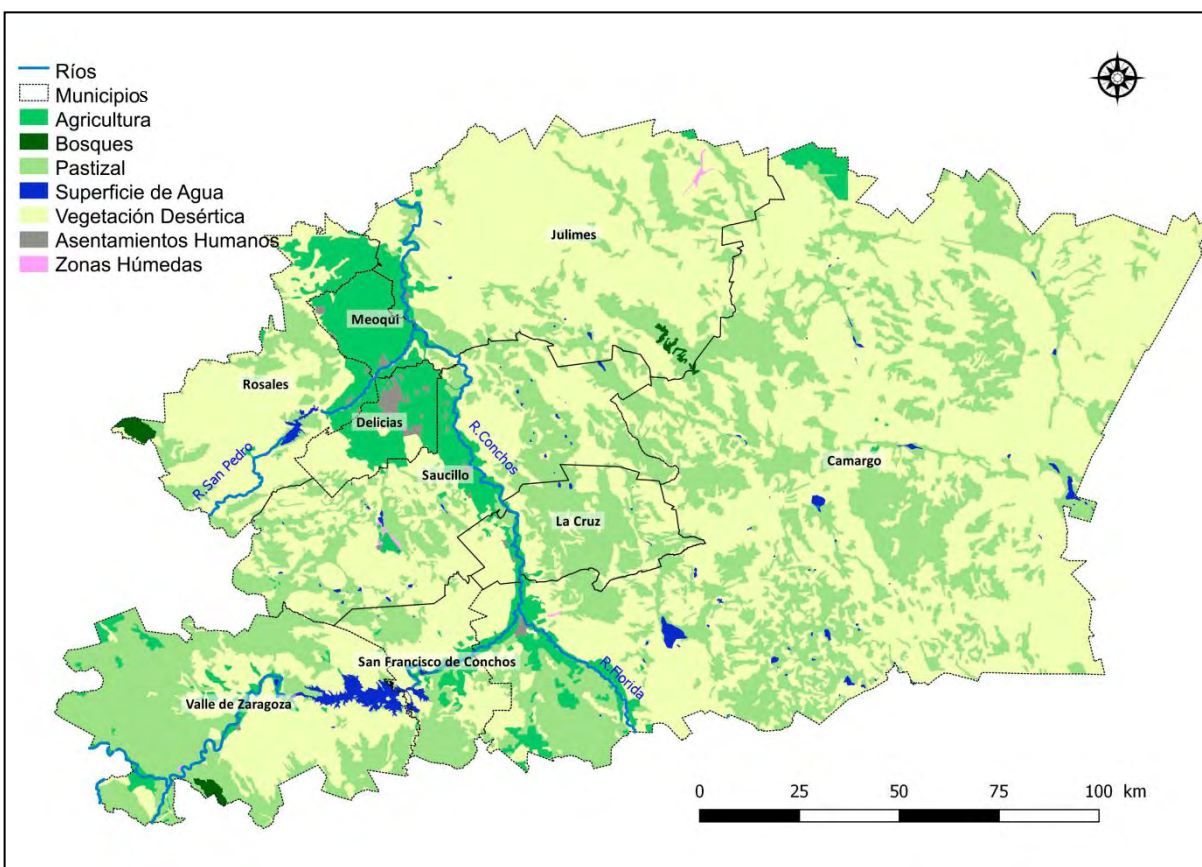
**Mapa 2: Las tres entidades del estado de Chihuahua**

Mientras que los análisis estadísticos se llevan a cabo en la totalidad del territorio chihuahuense, el análisis social, por su parte se centra en una región agrícola caracterizada por un alto rendimiento económico y problemáticas agudas de sobre-explotación de acuíferos y contaminación de recursos hídricos: la subregión de Delicias.

#### 1.4.2 *La subregión de Delicias*

Entrando en las ciudades de Delicias y Meoquí aparece el lema “vencedores del desierto”, el cual alude a dos realidades. Primero, estas ciudades constituyen centros de desarrollo relevantes (siendo Delicias la tercera ciudad más poblada del estado de Chihuahua). Luego, el dinamismo económico de este territorio fue adquirido mediante una labor considerable enfocado a “vencer” un ámbito semiárido (para mayor detalle, ver sección 2.1.2). Por esta coyuntura contrastada, el análisis de vulnerabilidad social se elabora para los dos municipios de Delicias y Meoquí y para los municipios de Julimes, Rosales y Saucillo que los rodea y componen con ellos la sub-región de Delicias de acuerdo a la *Secretaría de Desarrollo Rural* (2017).

Así definida, esta zona de estudio esto alimentada por dos ríos perenes (cuyas fuentes se encuentran en la Sierra Chihuahuense): el Conchos, y su afluente el San Pedro (Mapa 30). El hidro-sistema cuenta con dos presas importantes: la Boquilla situada en el Conchos, y Francisco I. Madero situada en el San Pedro. Estas presas alimentan la infraestructura agrícola más grande del Estado: el DR 005. Cuenta con 8108 usuarios regando 54 036 ha con una concesión equivalente a 707 724,3 miles de m<sup>3</sup> de agua (SEMARNAT-CONAGUA, 2015). De acuerdo a las configuraciones hidrográfica y socio-demográfica del territorio este DR se divide en dos partes regidas por dos *Sociedad de Responsabilidad Limitada* (SRL): la SRL San Pedro, y la SRL Conchos.



### Mapa 3: Región de Delicias (Zona de estudio)

La presente investigación se centra en el territorio correspondiente al canal San Pedro y la presa Francisco I. Madero, con lo cual se enfoca en la SRL San Pedro, la cual abarca cuatro Módulos (6, 7, 8 y 9). En este territorio también es de señalar la presencia de varias *Unidades de Riego* (UR). Estos dos tipos de estructuras están fundamentalmente relacionadas entre sí y conforman una región agrícola muy productiva, tanto que cobra una relevancia importante a nivel nacional (para mayor detalle, ver sección 2.1.2 y 2.5.1). Esta gran productividad induce fuertes demandas en agua, las cuales no siempre se logran satisfacer.

Además de las tensiones generadas a nivel local e internacional por la fuerte concentración de actividades agrícolas, la zona de estudio de Delicias se caracteriza por una sobreexplotación sistemática de los acuíferos (CONAGUA, 2015a). En este contexto, las Zonas de Veda (correspondiendo al marco legal establecido para evitar nuevas extracciones en el territorio mexicano) no bastan para que se regeneren las reservas de aguas subterráneas (Angélicaume-Descamps et Alarcón-Herrera, 2015). De manera paralela, el auge agrícola de la subregión desemboca también en un crecimiento urbano fuerte en las ciudades de Delicias y Meoquí (INEGI, 2010a). Al respecto es de notar que el aprovisionamiento en agua potable de estas ciudades y de las comunidades rurales que las rodean conlleva ciertas interrogaciones no solo a nivel cuantitativo, sino también a nivel de calidad del agua. Fuertes concentraciones de arsénico y fluoruros se evidenciaron en las aguas subterráneas de la región (Espino-Valdés, et al., 2009 ; Pineda, 2016). Frente a la amenaza sanitaria que representa a largo plazo el consumo de dichos elementos tóxicos, se implementaron plantas de potabilización con proceso de ósmosis inversa ; sin embargo las aguas de rechazo (concentrado) de estas plantas se vierten con las aguas negras y contaminan lo que es considerado hoy en día como un recurso para riego agrícola (Olmos Marquez et Alarcón-Herrera, 2014). En este tema también es de notar que si los municipios considerados en la presente investigación cuentan con buenas tasas de conexión de los hogares a las redes de saneamiento, el tratamiento de las aguas residuales sigue siendo limitado (CONAGUA et SEMARNAT, 2015 ; INEGI, 2010b).

Esta sección presenta la subregión de Delicias como un centro importante a nivel de desarrollo urbano y agrícola para el cual el manejo del agua es un tema primordial tanto por su relevancia socio-económica

como por las degradaciones físicas de este recurso. Dicho de otro modo, la exposición de este territorio a la escasez física en agua es inquietante pero parece matizada por destacables infraestructuras socio-económicas. El estudio resumido de la vulnerabilidad de su socio-sistema frente a la escasez en agua conlleva por lo tanto interrogaciones contrastadas.



## **Materiales y Metodología**

De acuerdo al marco teórico presentado el componente uso del IPA permite evaluar los retos del acceso al recurso hídrico en el marco de la reproducción económica y social de las sociedades estudiadas. Dos otros componentes integran en este índice las degradaciones hídricas cualitativas y cuantitativas:

- El componente medio ambiente mide la integridad ambiental del ecosistema considerado: se enfoca en datos de contaminación del recurso y de degradación ambiental vinculada con el agua y su gestión;
- El componente recurso por su parte mide la disponibilidad cuantitativa del recurso en el territorio.

Y los últimos componentes sirven en esta investigación para identificar y cuantificar los capitales económicos y sociales de las poblaciones; así:

- El componente acceso analiza las infraestructuras materiales que intervienen en la gestión del agua para cada tipo de uso (doméstico, agrícola y ganadero e industrial);
- Y el componente de capacidad cumple con la evaluación de las infraestructuras sociales y económicas que permiten o no garantizar el acceso al agua.

Con el fin de elaborar un diagnóstico operativo de la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua este análisis cuantitativo se completa con estudios cualitativos en el tema de la difusión de innovaciones en el manejo del agua: se presentan las metodologías empleadas en estas perspectivas.

### **2.1 Datos disponibles y selección de los indicadores del IPA**

Para fomentar la relevancia y uniformización del cálculo, la revisión y actualización de los indicadores del IPA se llevó a cabo en base a los siguientes criterios:

- Revisar los antecedentes de cálculo del IPA, analizando las diferentes alternativas, (para seleccionar las que estén más enfocadas a la dimensión interdisciplinaria del IPA).
- Evitar la redundancia de los datos (para restringir las correlaciones entre los componentes).
- Usar información disponible para toda la república a escalas relevantes para su interpretación a nivel municipal (para fomentar la uniformización del cálculo).

De acuerdo con la literatura especializada, los indicadores del IPA son colectados o disponibles a la escala de cálculo (Abraham et al., 2002; Lawrence, Meigh, & Sullivan, 2003; Wilk & Jonsson, 2013).

Por lo tanto se elaboraron en base a la revisión crítica de los antecedentes de cálculo del IPA y las bases de datos disponibles (Tabla 3).

**Tabla 3: Indicadores empleados para el cálculo del IPA**

|           | Indicador   | Datos   | Fuente   |
|-----------|---|---|--|
| Acceso    | Tecnificación del riego (mayoritaria por municipio) | Unidades de producción con sistemas de riego según sistema de irrigación utilizado      | (INEGI, 2007)  |
|           | Acceso al agua doméstica (%)                        | Acceso a la red de agua potable   | Censo de población y vivienda, (INEGI, 2010a) <sup>3</sup> |
|           | Acceso al saneamiento (%)                           | Acceso a servicios de saneamiento   |  |
| Capacidad | Índice de Desarrollo Humano <sup>4</sup>            | Ingreso Corriente Total Per Cápita (\$)   | (CONEVAL, 2010b)   |
|           |   | Coefficient de Gini   | (CONEVAL, 2010a)   |
|           |   | Mortalidad infantil (menores de un año) (‰)   | Censo de población y vivienda, (INEGI, 2010a)              |
|           |   | Grado promedio de escolaridad (mayor a 15 años)   |  |
| Uso       | Uso abastecimiento público (litro/cápita/día)       | Uso Público (m <sup>3</sup> )<br>Censo demográfico (hab)                                | (CONAGUA, 2010; INEGI, 2005, 2010b)                        |
|           | Uso agrícola (m <sup>3</sup> /\$/ año)              | Volumen concesionado: Agricultura (m <sup>3</sup> )<br>Valor de la producción (\$)      | (CONAGUA, 2010; INEGI, 2007)                               |
|           | Uso industrial (m <sup>3</sup> /\$/ año)            | Volumen concesionado: Industria autoabastecida (m <sup>3</sup> )<br>PBT industrial (\$) | (CONAGUA, 2010; INEGI, 2009)                               |
| Recurso   | Cantidad de agua superficial                        | Mapa de escurrimientos Superficiales promedios  | (Jiménez Roman & Maderey-R., 1992)                         |

<sup>3</sup> Es de notar que fueron publicadas en 2016 unas encuestas intercensales abarcando censos de población y vivienda para los años 2015-2016. Sin embargo, estas encuestas se presentan a nivel municipal, mientras que el censo de 2010 está elaborado a nivel local. Por ser un elemento de discusión interesante de la presente investigación, se usaron los datos de 2010.

<sup>4</sup> Los indicadores socio-económicos publicados en México son más numerosos que los que se suelen usar para calcular el IDH y por lo tanto la componente capacidad del IPH (Fenwick, 2010; Jemmali, 2013; Lawrence et al., 2003; Li et al., 2011). Eso refleja la posición singular de México frente a esos indicadores (Castelazo, Mendoza, Solis, Córdova, & Quevedo, 2007; López Álvarez et al., 2013; Parga, León, Vargas, & Fuster, 2006; Rentería Flores & Pérez Arredondo, 2010). Con el fin de ampliar las posibilidades de discusión de la metodología propuesta no se integran estos indicadores específicos, aunque su estudio podría resultar interesante en futuras investigaciones.



|                |                                     |  |   |
|----------------|-------------------------------------|--|---|
|                | Cantidad de agua meteorológica      | Mapa de climas   | (García, 1998)                            |
|                | Cantidad de agua subterránea        | Recarga media anual de los acuíferos   | (CONAGUA, 2015b)                          |
| Medio ambiente | Erosión hídrica del suelo           | Mapa de degradación de los suelos  | (SEMARNAT, 2004)                          |
|                | Degradación de suelo y/o vegetación | Mapas de uso de suelo y vegetación   | (INEGI, 1998, 2013b)                      |
|                | Sobre-explotación de acuíferos      | VCAS por Rt a la cual se quitan previamente las DNCOM                          | (CONAGUA, 2015b)                          |
| Calidad        | Calidad química                     | Índice de Calidad del Agua (DBO, DQO, SST, Coliformes fécales, ToxD48, ToxV15) | (CONAGUA, 2015c)                          |
|                | Contaminación agrícola              | Mapa de degradación de los suelos  | (INEGI, 2014; SAGARPA, 2012)              |
|                | Tratamiento de las aguas residuales | Volumen de agua tratada<br>Volumen de agua suministrada                        | (CONAGUA, 2010; CONAGUA & SEMARNAT, 2015) |

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) publica datos cualitativos y cuantitativos respecto a los recursos superficiales y subterráneos para todo el territorio mexicano. Dicha información fue la base para el cálculo del IPA en Chihuahua. Se consideró la siguiente información para construir indicadores hidrológicos (CONAGUA, 2018):

- Inventarios municipales de plantas potabilizadoras y de tratamiento de las aguas residuales en operación.
- Disponibilidad de aguas subterránea publicada por acuífero.
- Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual determina el nivel de contaminación de las aguas superficiales (CONAGUA, 2015b).

Los datos cartográficos publicados por La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2012) fueron empleados para elaborar indicadores de Recurso y Ambiente.

En esta perspectiva se consideraron:

- Mapa de escurrimientos Superficiales promedios.
- Mapa de climas.
- Mapas de uso de suelo y vegetación (USV).
- Mapas de degradación de suelo en la república Mexicana.

A partir de los mapas de USV, Delimitación de acuíferos y Divisiones municipales de México (CONABIO, 2012; CONAGUA, 2016) se llevó a cabo la representación cartográfica de los indicadores provenientes de las bases de datos de CONAGUA, (2018), y también los indicadores socio-económicos,

construidos a partir de datos estadísticos. Las componentes Acceso, Capacidad y Uso se elaboraron de acuerdo a la literatura específica del IPA. Los Censos de población y viviendas realizados por el INEGI, (2013), y los que conciernen los sectores económicos y concesiones de agua sintetizados por el INEGI (2018) en la plataforma SIMBAD en conjunto con los censos económicos del CONEVAL, (2016). Se integraron las bases de datos y construyeron los indicadores requeridos por cada componente del IPA (por más detalles ver secciones 2.2 y 2.3).

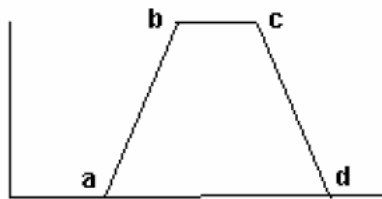
Todas las bases de datos empleadas para calcular el IPA son públicas y disponibles para todo el territorio mexicano, y cabe notar que la mayoría de los indicadores se construye a partir de metodologías tradicionales (por lo menos en México). No obstante, ciertos límites deben ser mencionados respecto a estos datos. Primero es de notar que la información de monitoreo económica mexicana no incluye el Producto Interno Bruto (PIB) a escalas municipales. Consecutivamente, este dato (tradicionalmente empleado en las componentes de capacidad y uso) se sustituyó por valores similares que se encuentran disponibles a la escala considerada (por más detalles ver sección 2.3.1). Cabe mencionar que solo tres indicadores permitieron distinguir las áreas urbanas y rurales: *educación, acceso a la red de agua potable y a servicios de saneamiento*. Por fin, debido a que no se publican bases de datos respecto al uso específico de fertilizantes e insecticidas en México, el indicador de degradación química asociado a las actividades agrícolas solo consta con dos niveles de degradaciones (por más detalles ver sección 2.3.3). El panorama resultante ilustra escasas variaciones, pero tiene la ventaja de resaltar las problemáticas buscadas en el contexto de monitoreo difícil (UNSG, 2016).

En suma, varios datos no permitieron construir los indicadores conforme a las metodologías que se suelen usar para construir el IPA. Este problema está mencionado desde el inicio del IPA, y de acuerdo a sus diseñadores se elaboraron los indicadores correspondientes imitando las metodologías tradicionales a partir de los datos disponibles (Lawrence et al., 2003). A partir de estos indicadores, para efectuar la estandarización de los mismos y el cálculo del IPA se aplica un Estudio Multi-Criterio (EMC): éste conserva la lógica de cálculo tradicional del IPA, pero conlleva adaptaciones relevantes que se presentan a continuación.

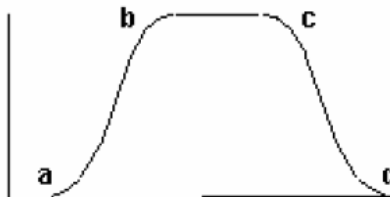
## **2.2 Estandarización de los indicadores mediante la operación “Fuzzy” del método EMC**

Los métodos de AMC consideran dos etapas fundamentales : la normalización y la agregación (J. R. Eastman et al., 1993; OECD & JRC, 2008). La primera corresponde a una interpretación estadística de los datos: permite escalonar los valores entre 0 y N, (condiciones mínimas y óptimas). En el presente estudio se enfoca al uso de la EMC, con lo cual la normalización de los indicadores se efectúa mediante el método “fuzzy”. Es de notar que se parece mucho al método tradicionalmente empleado para calcular el IPA puesto que transcribe los valores del mapa en grados de aptitud, jerarquizados del menos apto: 0 hasta el más apto: 1 (Figura 4, 5 y 6).

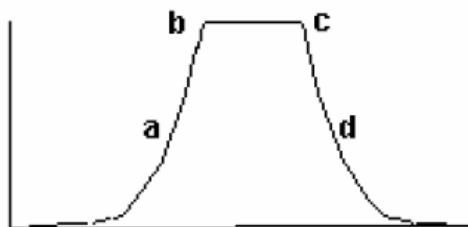
Específicamente , el método “fuzzy” convierte los datos a partir de tres tipos de funciones que permiten definir varias tendencias de aptitud (Jiang & Eastman, 2010; Paegelow & Olmedo, 2005; Yager, 1998). Los tres tipos de funciones se presentan en las gráficas presentados a continuación con el eje x correspondiente a los valores iniciales, y el eje y correspondiente a las aptitudes de dichos valores. Es de notar que se pueden aplicar también en el caso de que la aptitud sea exclusivamente creciente o decreciente. Para mayores detalles respecto al EMC ver sección 1.4.2.



**Figura 4: Función lineal**



**Figura 5: Función Sigmoidal**



**Figura 6: Función J-Shaped**

Ahora bien, ciertos indicadores están constituidos por datos numéricos, pero otros se generan a partir de datos cualitativos. Es el caso del indicador de acceso al riego, elaborado en base al tipo de agricultura y el tipo de riego mayoritario empleado en el municipio (Tabla 4). Para estos indicadores, se aplica una función linear. En el caso mencionado, el aptitud es creciente y se aplican los siguientes umbrales:  $a=1$  y  $b=5$ . Es de notar que en estos casos, los umbrales acaban siendo aplicables para cualquier territorio<sup>5</sup> (Para mayores detalles ver sección 2.4.1).

**Tabla 4: Valores numéricas aplicadas en el indicador de acceso al riego**

| Agricultura mayoritaria en el área | Categorías |
|------------------------------------|------------|
| Temporal                           | 1          |
| Canales de tierra                  | 2          |
| Canales revestidos                 | 3          |
| Multi-compuertas                   | 4          |
| Aspersión o goteo                  | 5          |
| Uso del suelo no agrícola          | 3          |

También se aplicaron umbrales fijos en el caso de ciertos indicadores numéricos. Es el caso de la mortalidad infantil, para la cual los umbrales se definieron en base a los datos presentados por la ONU a nivel mundial (Banque Mondiale, 2013). Sin embargo para valorarlos, se definieron funciones específicas cuyo comportamiento se precisa en la Tabla 5.

**Tabla 5: Valores empleados para estandarizar los indicadores**

| Indicador               | Escala de aptitudes |               |             |                        |
|-------------------------|---------------------|---------------|-------------|------------------------|
|                         | Datos inaptos       | Aptitud media | Datos aptos | Fuente                 |
| Tecnificación del riego | 1                   | *             | 5           | (Frenken, 2005; Parry, |

<sup>5</sup> Se necesitan más investigaciones en cuanto al comportamiento de la aptitud de estos indicadores: la presente investigación plantea este debate.

|                                     |                                |                           |                            |  |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|--|
|                                     |                                |                           |                            | Canziani, Palutikof, Van der Linden, & Hanson, 2007)   |
| Servicios de agua doméstica         | 0-10%                          | *                         | 90-100%                    |  |
| Servicio de saneamiento             |                                |                           |                            |  |
| ICTPC                               | <426\$                         | *                         | > 8902\$                   | (CONEVAL, 2010b)   |
| Coefficiente de Gini                | >63.4                          | 36.45                     | <24.8                      | (Banque Mondiale, 2016)  |
| Escolaridad                         | 0                              | 6                         | 10                         | (INEGI, 2010a; UN, 2011)   |
| Mortalidad infantil                 | >119                           | 37                        | <2                         | (Banque Mondiale, 2013)  |
| Uso abastecimiento público          | ≤ 7.5 l/hab/d<br>≥ 600 l/hab/d | 20 l/hab/d<br>300 l/hab/d | [50-100] l/hab/d           | (Howard & Bartram, 2003)   |
| Uso agrícola                        | 0.17 m <sup>3</sup> /\$        | *                         | 5797.7 m <sup>3</sup> /\$  | (CONAGUA, 2010; INEGI, 2007)   |
| Uso industrial                      | 0 m <sup>3</sup> /\$           | *                         | 759.96 m <sup>3</sup> /\$  | (CONAGUA, 2010; INEGI, 2009)   |
| Cantidad de agua superficial        | <0mm                           | *                         | >750mm                     | (Jiménez Roman & Maderrey-R., 1992)  |
| Cantidad de agua meteorológica      | 1                              | *                         | 20                         | (García, 2004)   |
| Cantidad de agua subterránea        | <0,5 hm <sup>3</sup> /año      | *                         | >1973 hm <sup>3</sup> /año | (CONAGUA, 2015b)   |
| Erosión del suelo                   | 1                              | *                         | 9                          | (SEMARNAT, 2004)   |
| Degradación de suelo y/o vegetación | 1                              | *                         | 6                          | (Chabrilat, 2015; Nuñez López, Reyes-Gómez, Gutiérrez, Alarcón-Herrera, & Maganda-Ramírez, 2015) |
| Sobre-explotación de acuíferos      | < -0,5                         | [-0,5 - 0,5]              | > 0,5                      | (Estados Unidos Mexicanos, 2000; Omar, 2015)   |
| Calidad química                     | 2                              | *                         | 10                         | (CONAGUA, 2015c)   |
| Contaminación agrícola              | 2                              | *                         | 8                          | (Babut et al., 2013; Legarreta et al., 2002)   |

|                                     |       |   |         |  |
|-------------------------------------|-------|---|---------|--|
| Tratamiento de las aguas residuales | 0-10% | * | 90-100% |  |
|-------------------------------------|-------|---|---------|--|

Por fin es de notar que en el caso de los indicadores de uso industrial o agrícola, no fue posible hallar en la literatura especializada umbrales de aptitud aplicables para el estudio. En este caso, se aplicaron funciones lineares y se aplicaron como umbrales los máxima y mínima observados en la república mexicana. Para eso se compararon los resultados obtenidos a nivel de Estados, y se observaron los valores óptimos y mínimos observados en los municipios de los Estados cuyos resultados eran óptimos o mínimos. La sección 2.4.1 presente de manera detallada la estandarización de cada uno de los indicadores del IPA.

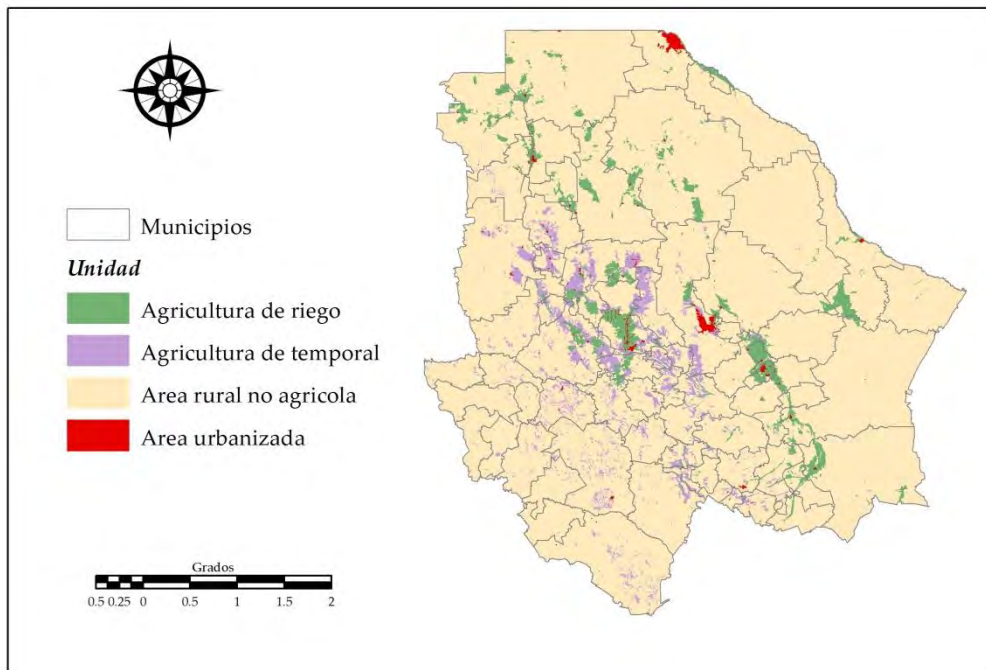
### 2.3 Ponderación e integración del IPA mediante las fases de cálculo del EMC

La propuesta original es atribuir la misma ponderación a todos los indicadores de una componente, y hacer lo mismo luego para todas las componentes (Sullivan, Meigh, & Lawrence, 2006). Este método se aplicó en varios estudios, y fue justificado de la manera siguiente: por una parte, evita dar más (o menos) importancia a un indicador, o un componente, y por otra, esta alternativa transparente facilita la comunicación con los principales destinatarios del IPA, o sea los tomadores de decisiones (Fenwick, 2010; Heidecke, 2006; Li, Wan, & Jia, 2011; Manandhar et al., 2012). Por esta razón también se usa esta estrategia en los 3 escenarios considerados para el cálculo del IPA.

Escenario 1: IPA-por-municipio. El primer escenario se calculó aplicando la ecuación 1, y valorando los indicadores socio-económicos directamente a la escala municipal. De esta manera, su representación cartográfica coincidió con las delimitaciones municipales; y no hay distinción a nivel geométrico de las áreas rurales y agrícolas.

Escenario 2: IPA-local. El segundo escenario se calculó incluyendo la representación cartográfica particular para distinguir los conjuntos rurales y agrícolas. Para distinguir las entidades rurales y urbanas se consideraron 2 criterios (Flores & Glez, 2015): 1) la concentración de la población y 2) las infraestructuras asociadas. El mapa de USV (CONABIO, 2012) distingue los territorios construidos de los que no lo son. Pero de manera paralela, el INEGI, (2013) distingue dos entidades demográficas : las comunidades rurales (con menos de 2 400 habitantes) y las ciudades (con más de 2 500 habitantes). Para asociar estos datos, el llamado IPA-local representa en cada municipio del Estado los datos relativos a

comunidades rurales en las áreas sin construcciones. Y al revés, se representan los datos relativos a las ciudades en las áreas urbanizadas. Luego, en lo que concierne las áreas agrícolas, los mapas de CONABIO (2012) distinguen áreas de temporal y de riego. Por lo tanto, los indicadores se concentran en las áreas correspondientes para cada municipio de la zona de estudio, con el fin de darles visibilidad a las diferentes problemáticas asociadas a este sector de actividad (Figura 7).



**Figura 7: Unidades territoriales consideradas para realizar mapas de indicadores de capacidad, uso y acceso.**

Escenario 3: IPA-OWA. El tercer cálculo se representa a través de la misma cartografía que el escenario 2, pero considera el método promedio ponderado ordenado (OWA por su sigla en inglés), reduciendo la compensación existente entre los componentes. Con este fin, la ecuación sigue siendo agregativa, pero se distingue de la ecuación 1 al añadirle pesos de orden (para mayores detalles ver sección 1.4.2). En este contexto, es preciso definir los fundamentos de la modelización, racionalizando los niveles de compensación y riesgo valorados en ella de acuerdo con la Tabla 6.

**Tabla 6: Estrategias OWA, ejemplo de compensación para cinco factores**

|                 |                            | Aptitud |            |            |            |        |
|-----------------|----------------------------|---------|------------|------------|------------|--------|
| Nivel de riesgo | Estrategia de compensación | Mínima  | Intermedia | Intermedia | Intermedia | Máxima |

|        |                   |      |      |      |      |      |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|
| Minimo | Nula              | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Leve   | Ejemplo pesimista | 0.45 | 0.25 | 0.15 | 0.1  | 0.05 |
| Medio  | Total             | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Fuerte | Ejemplo optimista | 0.05 | 0.1  | 0.15 | 0.25 | 0.45 |
| Maximo | Nula              | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    |

El objetivo de la presente investigación es discutir la visibilidad de los diagnósticos socioeconómicos e hidro-ecológicos en los resultados del IPA, y eso en el marco del estudio de vulnerabilidad. Por esta razón resulta interesante resaltar los indicadores y componentes más problemáticos. Por eso, se aplica la estrategia pesimista (presentada en la Tabla 6).

## 2.4 Análisis cualitativos

Los estudios cualitativos analizan – entre otros materiales – los discursos para observar las racionalidades de organización y gestión social (Blanchet, 1985). Se definen los discursos de la siguiente manera: cualquier enunciado verbal, sea oral o escrito, interviniendo en una comunicación entre por lo menos dos individuos. También se considera que el intercambio verbal constituye en sí una acción ya que determina perímetros de acción y procesos en los cuales ubica tanto los individuos involucrados en el acto de comunicación como los que no se encargan de ésa (Reinert, 1999). De acuerdo a esas definiciones coleccionar los argumentos de los actores sirve para dos de los objetivos planteados en esta investigación:

- Definir y analizar las redes de actores y sus interacciones en cuanto al manejo del agua y las transferencias de tecnologías hídricas;
- Analizar y comparar los enfoques que conviven en un mismo territorio a través de los proyectos tanto individuales como comunitarios relacionados con el manejo del agua.

Con este fin, entre otras metodologías, se contempló observar los argumentos e intercambios que se operan a nivel de individuos (Van Campenhoudt, 2011). Por lo tanto se trata de coleccionar argumentos que intervienen directa o indirectamente dentro del manejo del agua, se presentarán a continuación los métodos empleados para eso. Los datos coleccionados se analizan a través de dos niveles de interpretación de los resultados.

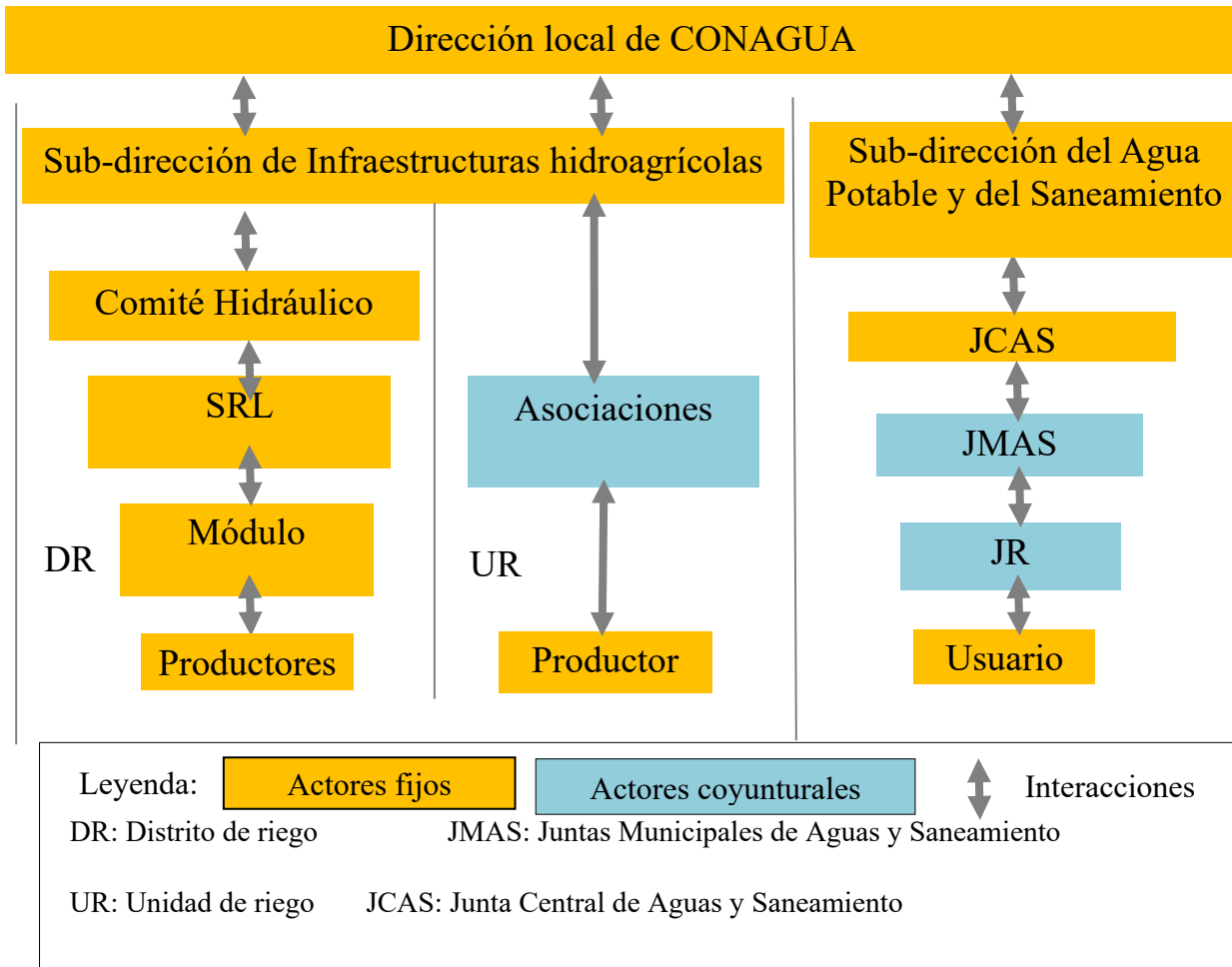


El primero sirve para presentar la zona de estudio en una perspectiva histórica y factual: se puede emplear de manera similar para cualquiera investigación. Para eso se seleccionan las informaciones más relevantes de las entrevistas y observaciones y se comparan entre sí y con la bibliografía científica. Éstos resultados servirán para comprobar la relevancia del IPA en los territorios considerados: en caso de que se detecten carencias también servirán para elaborar sugerencia de nuevos indicadores. Además estos mismos resultados permitirán definir localmente cuales son los actores involucrados tanto en el manejo del agua como en la difusión de innovaciones. Se interpretarán a través de esquema de actores cuya meta será nombrar éstos actores y representar las jerarquías oficiales. A partir de esto, se completará la colecta de discursos para entrar en sí en el estudio de la adecuación social y cultural entre los técnicos y la sociedad civil, y las dinámicas a los sistemas de actores. El segundo nivel de interpretación requiere de métodos específicos esta fase de análisis según las hipótesis consideradas, la población considerada y el material colectado. La colecta de datos y los niveles de análisis se desarrollan de tal forma que sirvan para el análisis AFFOM.

## **2.5 Población de estudio y colecta de discursos**

A partir de la revisión bibliográfica y de entrevistas previas, se realizó un esquema en el cual se identifica el sistema de actores vinculados con la gestión del agua en Chihuahua. Éste fundamenta la estrategia de colecta de discursos.

La figura 8, presenta los diferentes niveles de actores de la administración y gestión del agua a través de sus nombres, y representa sus características y relaciones a través de tamaños, colores y flechas. La jerarquía asociada a la extensión territorial de las acciones del actor se representa mediante el tamaño del cuadro en el que aparece su nombre. El color del cuadro indica si es un actor fijo, o sea que existe en todas partes del estado – color naranja – o si se trata de un actor variable o sea que en ciertas regiones no está constituido concretamente – color morado –. Por fin, las flechas indican las interacciones preestablecidas entre los actores.



**Figura 8: Sistema de actores de la gestión del agua en Chihuahua**

La figura 8 acaba diseñando un sistema de actores de manejo del agua en tres partes:

- ✓ Actores asociados al agua doméstica y al saneamiento;
- ✓ Actores del riego en el DR (el cual implica una estructura particular descrita en detalles en la sección...);
- ✓ Actores del riego en las UR (las cuales no cuentan con la estructura del DR).

Las relaciones que une (u opone) a estos actores entre sí y con el eco-hidro sistema determinan la vulnerabilidad asociada a la escasez en agua del socio-sistema. En la actualidad, estas relaciones llegan a transformar las infraestructuras y prácticas de manejo del agua (se presentan en detalle la tecnificación del riego y acarreamiento y tratamiento del agua en las secciones 1.1.1, 2.1.2 y 2.5.1). Y cabe notar que actores exteriores al sistema presentado en la Figura 8 llegan a fomentar estas transformaciones. En particular la *Secretaría de la Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA)* tiene como misión reforzar la producción agrícola y trabaja en este sentido con la CONAGUA y los

productores (mediante subvenciones, apoyos logísticos y capacitaciones). Universitarios, agrónomos y otros actores intervienen también localmente como “soportes de la innovación” manteniendo relaciones activas con los actores del sistema productivo (Heijs, 2001). Estos soportes, llamados en este caso “soportes de la adaptación” influyen de esta manera en la lucha contra la vulnerabilidad social, con lo que sus discursos también resultan relevantes en el presente estudio. Por fin es de notar que se otorga una atención particular a los productores con riego tecnificado por el hecho de que parecen más enfocados en la adaptación frente a la escasez en agua que los demás.

A partir de estas observaciones, se colectaron 71 discursos en la región de Delicias considerando 4 categorías de actores. Entre ellos, 31 fueron colectados mediante entrevistas con productores, y 39 con instituciones y representantes (Tabla 7). Es de notar que 16 actores son “multi-casquettes” o sea que pertenecen a más de una categoría (para mayor información respecto a la colecta de discursos, ver la sección 2.5.2).

**Tabla 7: Discursos colectados**

| Categorías de actores                                    |  | Código de los actores  | Número de actores | Actores “multi-casquette” |
|--|--|--|-------------------|---------------------------|
| Productores  | Sin tecnificación                            | P4 ; P6 ; P9 ; P11 ; P12 ; P13 ; P25 ; P26 ; P27 ; P33 ; P34 ; P42 ; P44 ; P45 ; P54 ; P55 ; P56 ; P63 ; P66 | 19                | 8                         |
|  | Con tecnificación                            | P18 ; P23 ; P35 ; P37 ; P38 ; P39 ; P40 ; P43 ; P46 ; P50 ; P64 ; P65  | 12                | 6                         |
| Autoridades y operadores de la gestión del riego         | Autoridades (instituciones y representantes) | I2 ; P6 ; I30 ; P31 ; P38 ; P39 ; P40 ; P45 ; P50 ; P56 ; I59 ; I69  | 12                | 8                         |
|  | Operadores                                   | I5 ; I28 ; I29 ; I32 ; I41 ; I47 ; I48 ; I49 ; I61 ; I62   | 10                | 0                         |
| Actores del manejo y tratamiento de las aguas domésticas |  | J1 ; J3 ; P4 ; J7 ; S8 ; J16 ; J21 ; J36 ; J51 ; J52 ; J53 ; P55 ; P56 ; J58 ; I69 ; J70                     | 16                | 5                         |
| Soportes de la adaptación frente a la escasez en agua    |  | S8 ; P9 ; S10 ; S14 ; S15 ; S17 ; P18 ; S19 ; S20 ; S22 ; P23 ; S24 ; P25 ; P44 ; S57 ; S67 ; S68            | 17                | 6                         |

La presente investigación estudia los discursos de personas e instituciones consideradas como actores de la gestión del agua – puesto que actúan dentro de esta gestión –, personas e instituciones involucradas en la transferencia de tecnologías y personal del área técnica. Se colectan por lo tanto mediante entrevistas comprensivas (Kaufmann, 2011). La meta de estas entrevistas es facilitar el discurso de los actores respecto a las temáticas estudiadas, o sea las capacidades de adaptación y fragilidades culturales, socio-económicas, e institucionales del socio-sistema (se presentan en detalle estas temáticas en la sección 2.5.2). Con esta perspectiva, se desarrollaron las entrevistas en base a palabras claves, presentadas en la Tabla 8.

**Tabla 8: Líneas directivas y términos empleados para realizar las entrevistas comprensivas**

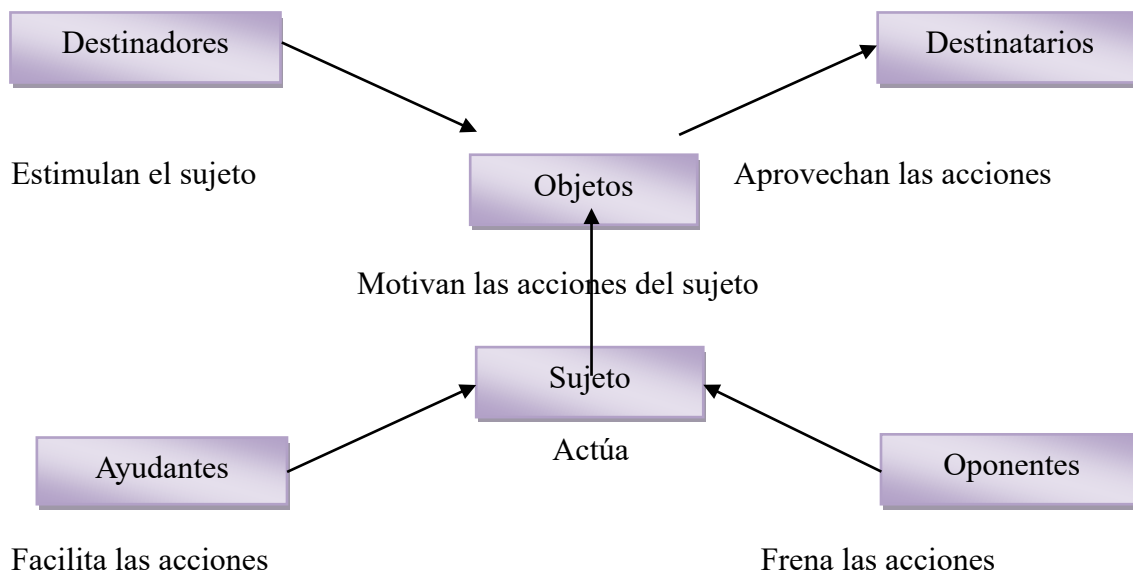
| <b>Temáticas</b>   | <b>Actores de la gestión del agua</b>  | <b>Soportes de la adaptación</b>  | <b>Usuarios del agua doméstica</b>                                  |
|--|--|---|---|
| Fragilidades culturales frente a los factores físicos de escasez en agua | Aprovisionamiento o Riego ; <b>Retos</b> ; Problemas de cantidad o calidad ; Presas ; Planta de tratamiento ; Pozos ; Rio ; Sequia | <b>Retos</b> ; Problemas de Cantidad o calidad ; Riego ; Presas ; Aguas negras ; Pozos ; Sequia | Agua ; Calidad ; Higiene ; Cocina ; Sequia                          |
| Fragilidades socio-económicas e institucionales                          | Gestión ; Repartición ; Acuerdos ; Apoyo ; <b>Contactos</b> ; Consejo ; SAGARAPA o <i>Juntas...</i> ; CONAGUA                      | Participación ; Precia ; Material ; <b>Contactos</b> ; SAGARPA o <i>Juntas...</i> ; CONAGUA     | <i>juntas...</i> ; Comités ; CONAGUA ; Responsabilidad ; Soluciones |
| Capacidades de adaptación  | <b>Proyectos</b> ; Cambios ; Saneamiento ; Salud   | Tecnificación ; Pozos ;   | Conexiones ; Salud ; Botellas ; Planta de tratamiento               |

Para ciertos actores de la sociedad civil se vuelve difícil obtener las entrevistas adecuadas por cuestiones de agendas administrativas. Sin embargo estos mismos actores suelen ser muy productivos de discursos

que se podrían llamar públicos: y éstos se pueden coleccionar a través de observaciones participativas. En esta situación los discursos, sean escritos u orales, no involucran directamente al investigador. Estos discursos públicos dan a ver las racionalidades de las autoridades públicas en cuanto al recurso, y al mejoramiento de su manejo. De hecho, se integran también a los discursos colectados, puesto que solo aumentan de manera ligera la diversidad que caracteriza cualquier colecta de datos mediante entrevistas.

## 2.6 Análisis de los discursos

Frente a este corpus heterogéneo, se requieren herramientas de análisis que preserven y valoren la diversidad y permitan por otra parte su comparación. En particular hace falta garantizar que se traten de manera estandarizada (Olivier de Sardan, 2008). Para eso se aplica un análisis temático el cual permite comparar de modo sistemático argumentos que presentan características diversas y preserva de modo relevante la diversidad de los datos colectados. En este caso, se define una guía de interpretación, adaptando el “esquema actancial” (Figura 9), la cual postula que “cualquier discurso o relato se organiza de acuerdo a un reto o una búsqueda. El análisis de su estructura debe otorgar que emerja su significado” (Van Campenhoudt, 2011). Este enfoque establece que además de los tradicionales objetos y sujetos del discurso, otros cuatro componentes lo definen: los destinadores, destinatarios, apoyos y oponentes<sup>3</sup>.



**Figura 9: Esquema “actancial” (elaborado a partir de Van Campenhoudt, 2011)**

Se presenta a continuación como fueron adaptados los “actantes” tradicionales por una parte:

- Los objetos: las entrevistas se realizaron de tal manera que el objeto de los discursos colectados sean la vulnerabilidad frente a la escasez en agua.
- El sujeto corresponde al emisor del discurso. En éste caso son actores – potenciales o efectivos – del manejo del agua y/o de la difusión de innovaciones.
- Los destinatarios corresponden a las categorías interpretativas asociadas a la temática. El análisis de este “actante” sirve para determinar los centros de interés del discurso.
- Los destinatarios constituyen por su parte las áreas físicas y socio-culturales en las cuales se evocan las temáticas. En otros términos brinda informaciones en cuanto al territorio y unidades antrópicas para las cuales el sujeto quiere actuar o no.

En cuanto a las interacciones que facilitan o frenan las acciones del sujeto, se consideran por una parte componentes humanos y por otra, componentes que no son humanos. En la primera configuración el estudio de los oponentes y apoyos sirve para observar el sistema de actores tal y como lo ve el emisor del discurso. Sin embargo éste puede también aludir a las interacciones que existen entre él y el objeto del discurso: al actuar o no, el sujeto influye en el objeto, y al revés el objeto puede fomentar u obstaculizar las acciones y proyectos del sujeto. Con lo que se definen los componentes siguientes:

- Las restricciones permiten considerar las interacciones entre objeto y sujeto que frenan sus estrategias.
- Las oportunidades permiten considerar las interacciones entre objeto y sujeto que facilitan sus estrategias.
- Los oponentes se refieren a los actores con los cuales el emisor señala que tiene conflictos directos o indirectos.
- Los apoyos se refieren a los actores con los cuales el emisor señala colaborar directa o indirectamente.

Éstas son las herramientas que se usan para organizar y estandarizar el corpus heterogéneo de discursos colectados. Una vez organizado bajo esta forma, se trata el corpus comparando los discursos entre sí: buscando las coocurrencias entre ellos, estableciendo tipologías que los acercan o separan.

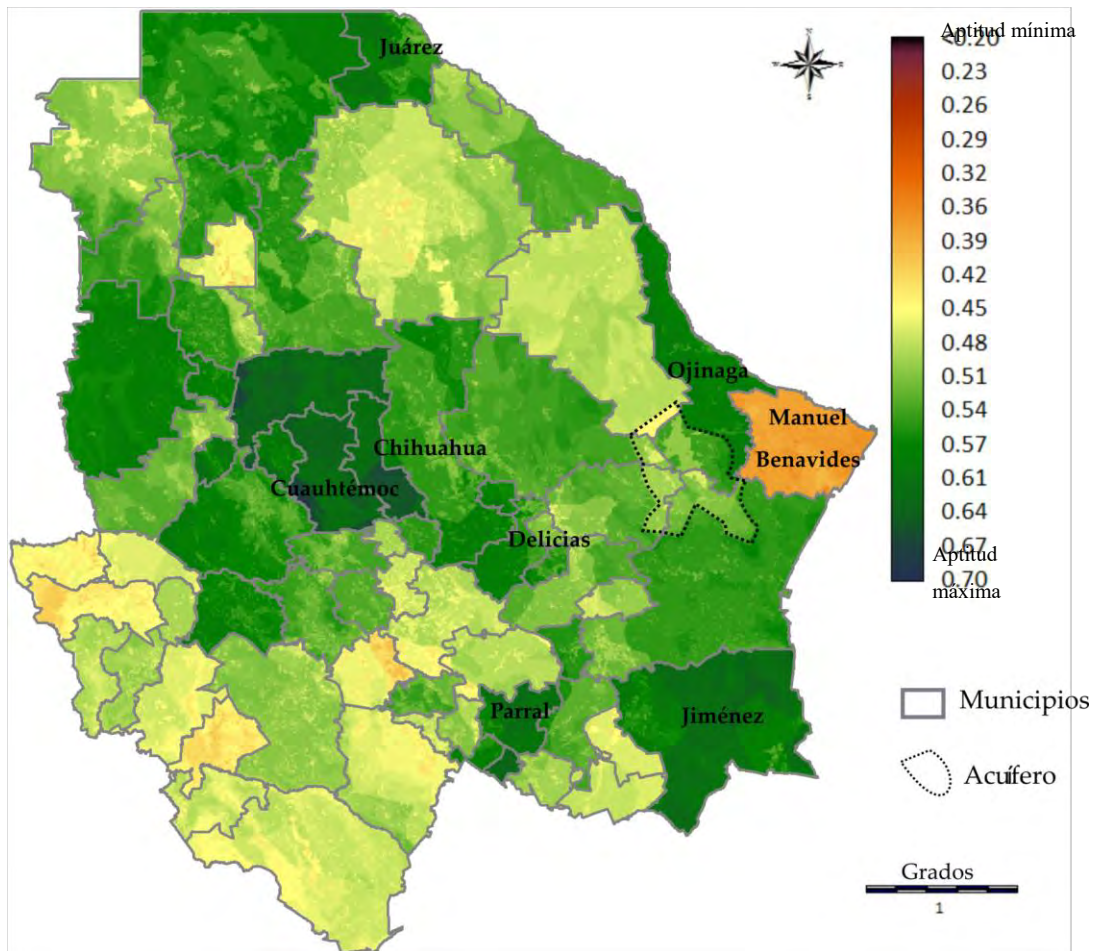
Cada una de estas herramientas facilita el procesamiento de los datos colectados y permite en este caso realizar un análisis AFFOM centrado en la vulnerabilidad del sociosistema frente a la escasez en agua. Concretamente, el análisis AFFOM consiste en desarrollar una tabla en la cual se sintetizan a la vez las fuerzas y debilidades del sistema considerado, y las amenazas y oportunidades externas a este sistema. El esquema actancial se adapta para que el objeto, el destinatario y destinatario son exteriores no solo al sujeto sino también al sistema de actores (para mayores detalles ver la sección...). De esta manera estos

tres componentes del discurso permiten definir las oportunidades y amenazas. Y la identificación de los sujetos, ayudantes y oponentes en el sistema de actores permite determinar sus fuerzas y debilidades. En la región de Delicias, se asocian el análisis del IPA y el análisis social (presentado bajo la forma de un cuadro AFFOM) para definir la vulnerabilidad de manera interdisciplinario y realizar un diagnóstico operativo.

## Resultados

### 3.1 Resultados del IPA-por-municipio (Escenario 1)

Los resultados del IPA-por-municipio se presentan y analizan a continuación a través del comentario del Mapa 4.



*Mapa 4: IPA-por-municipio, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 1 con delimitaciones municipales.*

El IPA-por-municipio del Estado de Chihuahua está incluido entre 0.30 y 0.70 (Mapa 4). Los mayores valores de IPA (entre 0.70 y 0.51) se observan en los municipios que tienen mayor población (zona urbana) y mayor actividad económica agrícola y minera: Cuauhtémoc, Juárez, Ojinaga, Jiménez, Parral,



Chihuahua y Delicias. Contrariamente, en las regiones de la Sierra y los municipios desérticos marginalizados, los resultados son inferiores a 0.50.

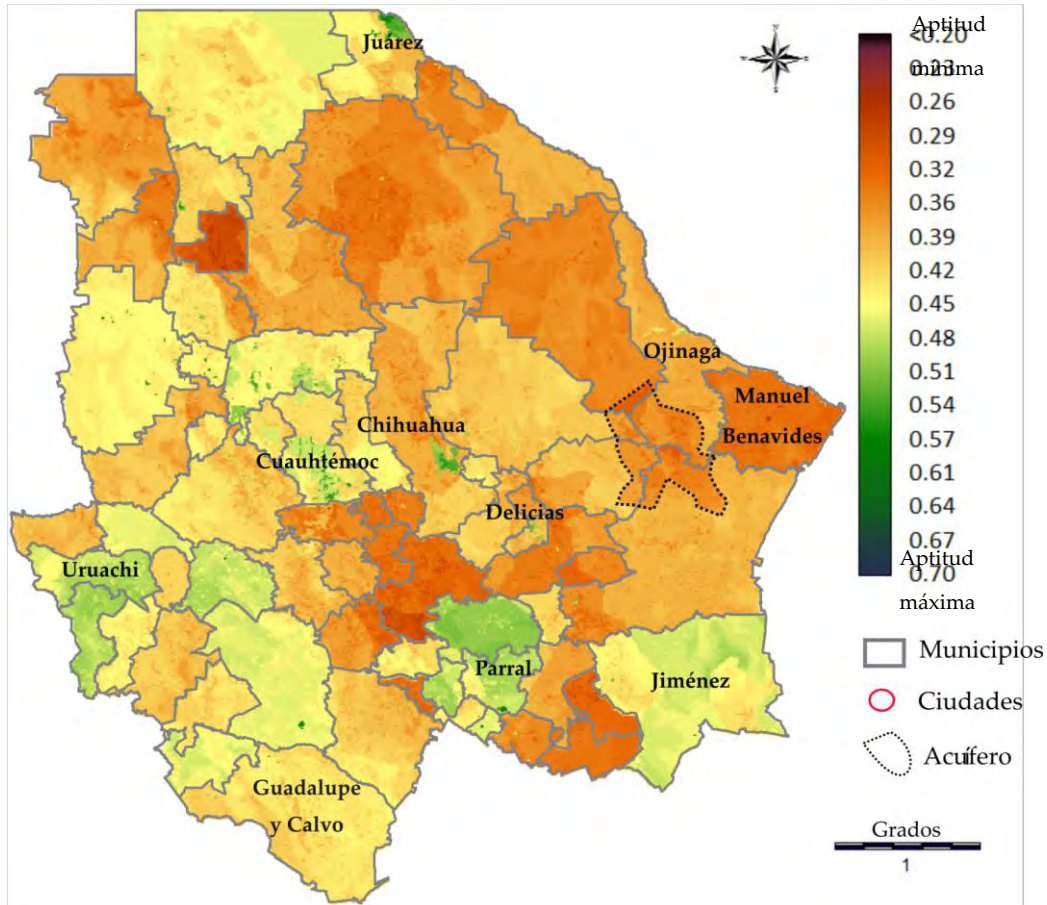
Los indicadores de recurso y ambiente (Tabla 3) generan las formas más claras observables en las entidades municipales (para mayor detalle al respecto ver la sección 3.2). Entre ellas resalta el indicador de sobreexplotación de acuíferos, al sur de Ojinaga: toma la forma de una sombra más clara que no corresponde a delimitaciones municipales y cobra – sin embargo – una forma geométrica extensa y perfectamente delimitada entre cinco municipios. Manuel Benavides y dos otros municipios poco poblados reciben puntuaciones inferiores a 0.40. Estos asocian bajas aptitudes para el componente de *recurso*, pero también al de *acceso* y de *uso*.

### **3.2 Resultados del IPA-local (Escenario 2)**

El IPA-local del Estado de Chihuahua está incluido entre 0.60 y 0.26 (Mapa 5).

Las grandes ciudades del Estado (Juárez, Chihuahua, Cuauhtémoc, etc.), pero también las pequeñas resaltan a través de pequeñas manchas oscuras, indicando puntuaciones superiores a 0.47. En cambio solo algunos municipios obtienen IPA cercanos a la media: Parral y Uruachi (municipios mineros), y Jiménez (caracterizado por minas y fuertes producciones de nuez pecanera).

Manuel Benavides y otros municipios caracterizados por una ausencia de ciudades registran un IPA-local muy bajo (inferior a 0.33). Sus puntuaciones se deben a bajas aptitudes en los indicadores de los componentes de *acceso* y *uso*: clima y sobreexplotación de acuíferos. También el acuífero sobreexplotado situado al sur de Ojinaga aparece a través de una forma geométrica con puntuación inferior al resto de los cinco territorios municipales que va cruzando. Inversamente, en la Sierra las puntuaciones son superiores a 0.42.



Mapa 5: IPA-local, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 2 con delimitaciones municipales.

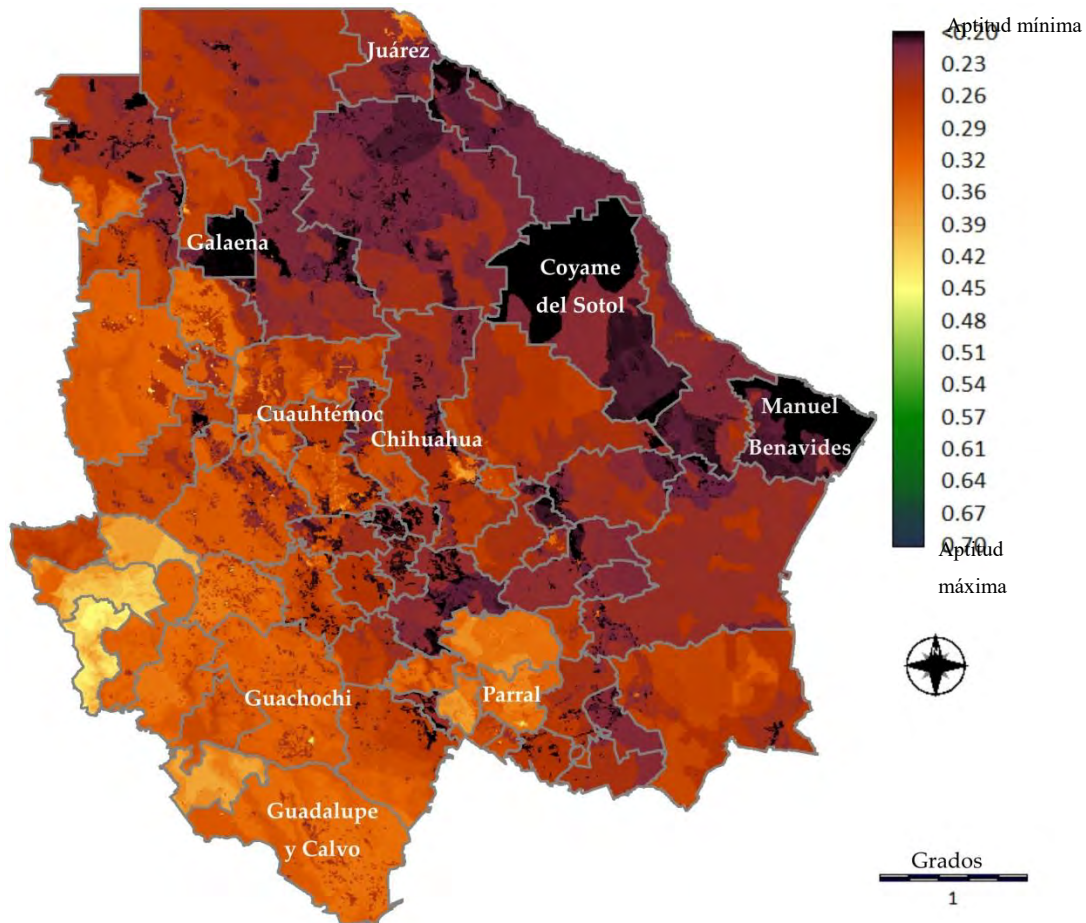
Finalmente, solo las áreas de riego ubicadas en la región de Cuauhtémoc resaltan por tener IPA superiores a las áreas rurales no agrícolas: apareciendo las primeras a través del color verde, mientras las segundas aparecen con colores naranja. Las otras no aparecen, y en Guadalupe y Calvo por ejemplo, el riego de temporal se caracteriza por IPA levemente más bajo que las áreas rurales no agrícolas.

### 3.3 Resultados del IPA-OWA (Escenario 3)

El IPA-OWA se concentra entre 0.20 y 0.35 (Mapa 6). En la zona de la sierra, las delimitaciones municipales son predominantes y concentran puntuaciones más altas que el resto del Estado (de 0.30 a 0.45).

El indicador de clima del componente de recurso explica la mayoría de las delimitaciones no municipales en el este desértico del mapa (valores entre 0.23 a 0.20). En paralelo, algunos municipios

aparecen. Galana, Manuel Benavides y Coyame del Sotol registran IPA-OWA inferiores a 0.21. Contrariamente, Parral y Jiménez sobresalen (entre otros) por ligeros aumentos del IPA (son más claros). También es el caso de las ciudades de los municipios de Chihuahua, Juárez, Parral, Guachochi, etc.



**Mapa 6: IPA-OWA, resultados de cálculo de acuerdo al escenario 3 con delimitaciones municipales.**

Finalmente, el IPA-OWA da a ver superficies agrícolas a través de las manchas puntuales que aparecen principalmente en color negro en los desiertos y rojo oscuro en la Sierra (Mapa 6). Entre ellas es de notar que el riego de temporal observado en el municipio de Guadalupe y Calvo, se caracteriza por mostrar valores de IPA inferiores de 0.06 puntos – al menos – en comparación con el territorio rural no agrícola del municipio. Contrariamente, las áreas de riego agrícola ubicadas en la región de Cuauhtémoc obtienen resultados superiores de 0.03 puntos a los del territorio rural no agrícola de este municipio.

### 3.4 Resultados del análisis de vulnerabilidad social en la región de Delicias

Dada la diversidad de las problemáticas estudiadas, esta sección presenta los resultados obtenidos en ámbito agrícola antes de presentar los resultados respecto a los servicios de agua potable y saneamiento, el ambiente y la calidad del agua. Cabe notar primero que tanto en el DR como en las UR, las relaciones existentes entre el hidrosistema, las autoridades, los operadores del riego, y los productores son complejas (para más detalles ver la sección 3.4.1). Y estas relaciones se expresan a través de diferentes prácticas agrícolas (diversas semillas y sistemas de riego). Para explicar estas diferencias, los discursos recopilados atribuyen una importancia significativa al tamaño de las explotaciones: los “*grandes productores*” (sembrando más de 100 a 200 ha) se presentan como menos vulnerables que los demás. Los otros productores se consideran como “*pequeños productores*”, pero algunos actores también distinguen “*productores medianos*” (granjas entre 20-30 ha y 100-200 ha) y “*pequeños productores*” (tenencias de menos de 20-30 ha). Esta tipología se refiere a una realidad física y económica, pero también incluye dimensiones que podrían llamarse administrativas. Primero, es de notar que dadas las extensiones informadas, los *grandes productores* son relevantes usuarios del DR. Luego, una idea subyacente a la diferenciación por tamaño de explotación es que los *grandes productores* cuentan con un fuerte apoyo de las instituciones, mientras que otros recibirían apoyos mínimos. Esta representación ampliamente difundida tiene consecuencias notables en el sociosistema: alude al problema de la corrupción y contribuye a dividir los actores y frenar las acciones colectivas. De ello, resulta que las desigualdades (junto con la complejidad de la gestión del riego) alimentan tensiones locales y causan fragilidad social: se acusan tanto los vecinos como las autoridades y los operadores del riego por corrupción y robos de agua. Estas también generan una fragilidad institucional destacada en lo que concierne las dos instituciones mayoritariamente implicadas en temas de escasez de agua en áreas agrícolas: CONAGUA y SAGARPA.

Los discursos recopilados fuera de estas instituciones se refieren casi exclusivamente a las funciones reglamentarias y operativas de CONAGUA (las pocas excepciones son las autoridades de riego y los soportes de la adaptación). Además, aparte de CONAGUA (y JCAS), ningún actor entrevistado se refiere a los diferentes niveles de gestión de esta institución: todas las referencias usan el nombre genérico de “CONAGUA”. Esto parece indicar que los productores no están familiarizados, o prestan poca atención, a los componentes de esta institución. Además, pocos productores se refieren a los subsidios de CONAGUA, mientras que algunos soportes de la adaptación junto con las autoridades del

riego los mencionan. Esto puede interpretarse como una falta de reconocimiento por parte de los productores y / o una falta de participación local por parte de CONAGUA. En ambos casos, las entrevistas tienden a indicar que los productores mantienen pocas relaciones con CONAGUA en lo que concierne la adaptación a la escasez de agua. También es de notar que los pocos productores que llegan a hacer referencia a los subsidios de CONAGUA (siendo también autoridades del riego o soportes de la adaptación) insisten principalmente en los límites de estos subsidios: " *A él, [el ingeniero] le dice el gobierno federal: 'promueve la tecnificación'. Pero él les dice: 'es que no pueden económicamente, si va a ser al 50-50 no se va a lograr'. Entonces él les hace la propuesta de 90-10'*"(P6).

En lo referente a SAGARPA, las entrevistas también evidencian fragilidad institucional a pesar de que parezca con menos intensidad que en el caso de CONAGUA. Cabe notar que su presencia (directa e indirecta) en el territorio es notable, lo cual parece frenar las críticas y las sospechas y fomentar la negociación. De hecho, las entrevistas aluden a varios tipos de interacciones entre SAGARPA y los productores; se mencionan:

- ✓ Los subsidios
- ✓ Pero también cierta comunicación y asesoría dirigida a los productores en cuanto a los programas de subsidios y las técnicas agrícolas modernas (para mayores detalles ver la sección 3.4.2).

Un límite destacado por muchos actores respecto a la adaptación frente a la escasez en agua reside en el hecho de que pocos productores parecen interesados: "*En la Comisión Nacional de Zonas Áridas, Dan apoyos y donde toma los proyectos. Un proyecto de una comunidad se puso allí un ejido. No hay duda de que puede llegar a las capacidades, no importa. Los beneficiarios no vienen, o uno que otro. Yo lo hagamos aprovechar la capacitación e invitar a otros. Porque luchamos por que vengan los beneficiarios*"(S10). Esta observación señala una falta de interés por parte de ciertos productores la cual puede atribuirse directamente a los productores o bien a la poca relevancia de las pláticas e inversiones correspondientes. Eso evidencia una división, y por ende una fragilidad, cultural además de que confirma la fragilidad institucional mencionada previamente.

En este contexto la aplicación de soluciones respecto a problemas de salud y medioambiente aparece particularmente difícil. Las entrevistas evidenciaron su "invisibilidad" (para mayores detalles ver las secciones 2.5.2 y 3.4.3). En particular, si bien las sequías de los últimos años aparecen con fuerza en los discursos recopilados, los actores entrevistados rara vez mencionan la disminución de las aguas subterráneas y la contaminación del agua. Respecto a las primeras (aguas subterráneas), cabe notar que el funcionamiento no lineal del hidrosistema alimenta ciertas confusiones y dudas. Los productores



notan por ejemplo que en algunas parcelas de Meoquí las aguas poco profundas corren de manera casi continua (Ilustración 1). De acuerdo a los discursos de expertos (INIFAP) el fenómeno observado depende de dinámicas subsuperficiales, las cuales no llegan a invalidar la sobreexplotación de acuíferos. Sin embargo, alimenta el mito de la abundancia y contribuye a incrementar la desconfianza en el sistema de actores.



**Ilustración 1: El agua extraída de este pequeño pozo genera dudas en cuanto a la sobreexplotación de los acuíferos**

Parece que las dudas en cuanto a la degradación cuantitativa de los recursos subterráneos y superficiales junto con la desconfianza se refuerzan en la actualidad, dado que:

- ✓ Durante los episodios de sequía de las últimas décadas, no todos los productores fueron impactados de igual manera: "*En la tormenta los águilas se salvan... vuelan alto. Aquí hubo águilas cuando ya no había agua*";
- ✓ Se implementaron estrategias de manejo de las presas a más largo plazo, lo cual alimenta la idea de que con la voluntad adecuada todo es posible;
- ✓ Se abrió una industria de fabricación de cerveza en el centro de la subregión.

Las entrevistas colectadas asocian estos eventos y dinámicas a los temas de corrupción, los cuales acaban justificando la fuerte extracción y explotación del recurso.

El mito de la abundancia se impone como una representación muy extensa en el sistema de actores, y explica al menos en parte la sobreexplotación masiva de los acuíferos en la zona de estudio. Justifica por ejemplo la reubicación de pozos secos en los tres módulos estudiados (la Ilustración 2 siendo del Módulo 7). Se comprobó que esta estrategia está promovida incluso por CONAGUA, la cual fundamenta estas acciones en la reasignación de aguas promovida entre otros por la FAO (para mayores detalles ver la sección 2.5.1 y 3.4.2).

| 2012-2013      |                      |              |
|----------------|----------------------|--------------|
| No. LOTE       | NOMBRE DEL USUARIO   | SUPERFICIE   |
| 5594           | AMADOR CHAVEZ        | 6.00         |
| 5597           | REFUGIO ARRAS        | 6.00         |
| 5232           | LUIS VILLESAS        | 6.00         |
| 5599           | JOSE LUIS CISNEROS   | 6.00         |
| 5600           | PEDRO MENDOZA        | 6.00         |
| 5602           | OTONIEL SEPULVEDA    | 6.00         |
| 5348           | JOSE SEPULVEDA       | 6.00         |
| 5357           | ROMAN PATIÑO         | 6.00         |
| 5593           | ANTONIO MORALES      | 6.00         |
| 5603           | CHAPO MEZA           | 6.00         |
|                | PAULO CHAVEZ         | 6.00         |
| 5598           | ERICK PEÑA           | 6.00         |
| 5599           | MA. ISABEL RODRIGUEZ | 6.00         |
| 5344           | TOÑO JAVALERA        | 6.00         |
| <b>TOTALES</b> |                      | <b>84.00</b> |

**Ilustración 2: « Relación de usuarios beneficiados con la relocalización del pozo oficial n°87 »**

Por otra parte los problemas de contaminación del agua están poco comentados en las entrevistas: ciertos temas como el del arsénico son tabúes, y señalan tensiones pero también intereses fuertes al respecto. En cuanto a la gestión del agua potable y aguas residuales, el mantenimiento y la adaptación de los sistemas correspondientes son principalmente obstaculizados por problemas financieros y culturales. Los organismos de gestión señalan que pocos usuarios pagan por el agua que consumen. En paralelo, es de notar que los usuarios entrevistados no mostraron mucho interés hacia estos temas a cargo de autoridades públicas. A través de estos comentarios la fragilidad institucional destaca también en este ámbito, aunque sea de forma diferente al ámbito agrícola.

En este contexto, el mantenimiento y la extensión de la infraestructura se llegan a presentar como un desafío. En el caso de las JMAS y de Juntas de agua antiguas y chicas, la estructura y el modo de toma de decisiones y colecta de fondos son tradicionales y presentadas como obvias. Pero en paralelo varios actores de JR insisten en sus dificultades, preocupación y desafíos (J1, J3, J52): estos actores notificaban dificultades para establecer un marco adecuado de administración del agua potable y señalando las dificultades encontradas individualmente para superarlos.



**Ilustración 3: Local de una JR de la zona de estudio**

En este contexto aparecieron dudas en particular respecto a las estaciones de tratamiento de agua (J21):

- ✓ ¿Quién tiene la responsabilidad del saneamiento y el tratamiento del agua?
- ✓ ¿Cómo configurar un proyecto de tratamiento de agua?
- ✓ ¿Estarán operadas de manera adecuada las infraestructuras de tratamiento de agua?

También existen dudas con respecto a la purificación del agua del agua:

- ✓ ¿Cómo administrar un JR?
- ✓ ¿El agua estará clorada adecuadamente en todas las JR?
- ✓ ¿Quién usa el agua de las purificadoras con ósmosis inversa?
- ✓ ¿Cómo administrar las plantas purificadoras en el dominio público cuando las ganancias atraen intereses privados?

A estas interrogaciones relacionadas con la purificación del agua y el tratamiento del agua, se añaden otras respecto a prácticas agrícolas que pueden ser significativamente contaminantes. En el área de



estudio, pocos productores mencionaron los beneficios de la agricultura orgánica lo cual indica que las prácticas correspondientes tienen poca difusión en la zona de estudio. En resumen, los problemas de calidad del agua son poco visibles en las representaciones sociales. Al respecto es de notar que no se pudo identificar ningún soporte para la adaptación en estos temas. Contrariamente a los temas agrícolas donde se dieron a ver relaciones entre la comunidad científica y los actores de la gestión del riego, parece que la comunicación pública respecto a la adaptación en temas de calidad del agua es limitada tanto en términos cuantitativos como en términos cualitativos. Durante el Foro Expo-agro / Agua celebrado en Chihuahua en 2016 (Ilustración 4) por ejemplo las presentaciones enfocadas a la agronomía atrajeron mucha asistencia, mientras que las presentaciones explícitamente enfocadas a temas de calidad de agua generaron muy poca audiencia. Durante este evento, varios agrónomos abordaron el tema de la agricultura orgánica y la inocuidad, vulgarizando estos temas.



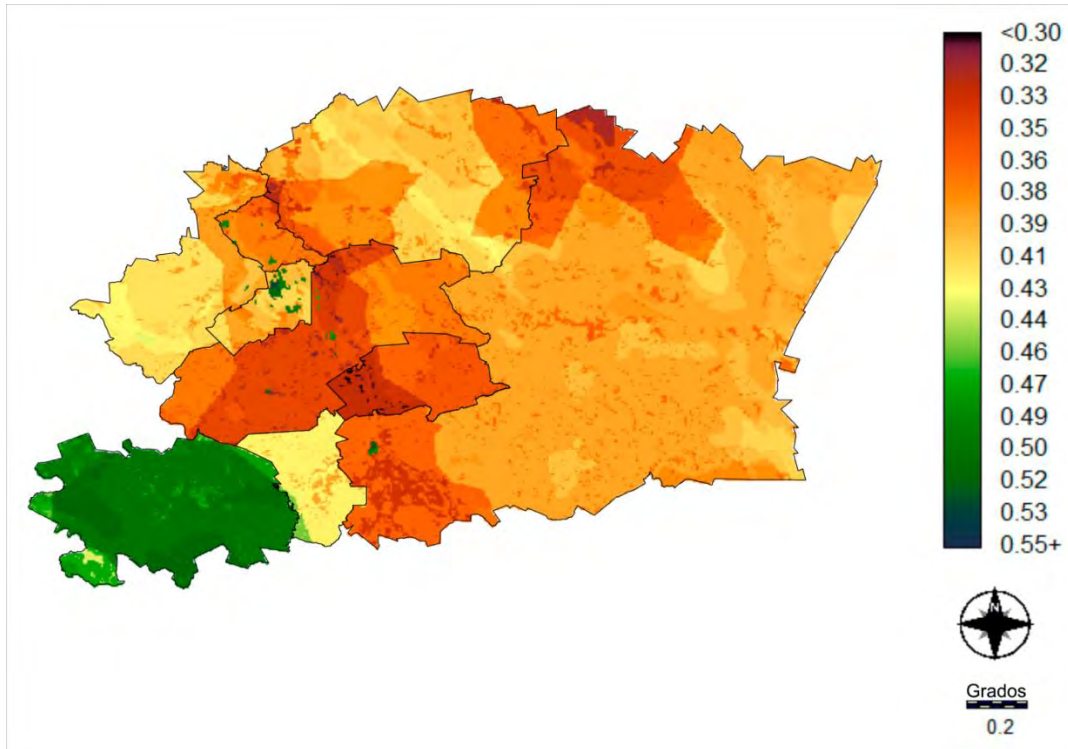
**Ilustración 4: Conferencia de apertura del evento expo/agro y foro del agua en Chihuahua (2016)**

Luego como parte de los Comités de Desarrollo Sostenible (llevan a cabo mensualmente en los municipios de Julimes y Rosales) varios científicos e ingenieros se refirieron a problemas de contaminación de agua y suelos. Sin embargo, durante las entrevistas con agricultores, varios de ellos insistieron en su incompreensión ante estos discursos especializados. Es importante señalar un último resultado al respecto: incluso las organizaciones y asociaciones enfocadas a la preservación del medio ambiente (S15 y S20) hablan poco de los temas de contaminación y sobreexplotación de acuíferos (sus

discursos se centran exclusivamente en el tratamiento de las aguas negras y en el uso de aguas superficiales). Los actores entrevistados incluso indicaron que los problemas deben tratarse en orden: considerando que la escasez, la pobreza y la salud a corto plazo son más urgentes que otros problemas ecológicos y sanitarios asociados con períodos de tiempo más largos (entre ellos se incluyó el caso del arsénico).

### **3.5 Resultados del análisis de vulnerabilidad en la región de Delicias, incluyendo el IPA y el análisis AFFOM**

Los IPA del área de estudio se concentran principalmente entre 0,30 y 0,43, lo que corresponde a una severa pobreza de agua (Maheswari, et al., 2017). El análisis del Mapa 7 permite especificar las diferentes dimensiones de estos resultados e interpretarlas en términos de exposición y fragilidades frente a la escasez en agua. Primero es relevante el impacto del componente de recursos en la sub-región considerada, la cual está expuesta a un contexto hidro-climatológico característico de los territorios semiáridos. Luego, la pobreza de agua reportada en el Mapa 7 también señala una fragilidad y exposición a los factores socio-económicos de escasez en las áreas rurales, las cuales obtienen bajas aptitudes en cuanto a los componentes de capacidad (indicadores de desarrollo humano) y acceso (indicadores relativos al agua y al saneamiento). Por el contrario, las ciudades destacan con IPA medianos, los cuales señalan su poca fragilidad y exposición socio-económica en comparación con las áreas rurales.



**Mapa 7: IPA-local en la sub-región de Delicias**

También cabe mencionar que las variaciones municipales son ligeras en todo el mapa; y los cuatro municipios en los cuales se llevó a cabo la colecta de entrevistas (Delicias, Meoquí, Julimes y Rosales en el noroeste del mapa) tienen comportamientos particularmente similares. Esto alude a la unidad económica de esta región y la reafirma. Otra observación que se hace de la subregión de Delicias: sus corredores agrícolas están afectados por la sobreexplotación de acuíferos. Al respecto, también resulta que el DR005 no aparece en el mapa: esto se explica por el hecho de que sus fuertes aptitudes en términos de uso se compensan con los indicadores de acceso y contaminación. En otras palabras, las fuerzas económicas son localmente neutralizadas por la exposición a problemas ambientales y la fragilidad (y poco desarrollo) de infraestructuras de tal manera que no destaca su vulnerabilidad ni positiva, ni negativamente. Luego es de notar que algunas áreas (restringidas) aparecen en el Mapa 7 a través de manchas más oscuras: señalan en su gran mayoría degradaciones del suelo y vegetación y traducen una exposición y fragilidad frente a las dinámicas antrópicas correspondientes. Y por fin, aunque el Mapa 7 por sí solo no lo muestra, el análisis de las secciones 2.2.3 y 3.1.3 insiste en las carencias del IPA respecto a las problemáticas de calidad del agua. A pesar de ser indirecto este resultado es particularmente relevante en la subregión de Delicias.

En suma, de acuerdo al IPA-local la región está expuesta a condiciones hidroclimáticas difíciles, y a degradaciones ambientales (particularmente sobreexplotación de los acuíferos y contaminaciones del recurso hídrico). En este contexto la población (principalmente concentrada en las ciudades) tiene una leve fragilidad socioeconómica (entre otros, gracias a actividades agrícolas).

Por su parte el estudio cualitativo de los discursos (sintetizado en la Tabla 9) evidencia una fragilidad institucional notable y diversas situaciones de fragilidad socio-económica y cultural. Respecto a las capacidades de adaptación de los actores integrados en el socio-sistema estudiado respecto cabe mencionar que varias acciones se implementan en la sub-región de Delicias para fomentar el desarrollo agrícola a pesar de la escasez en agua. Como resultado se observa un dinamismo económico y cultural interesante. Sin embargo, las divisiones sociales siguen siendo fuertes y se refuerzan con la competición para acceder un recurso degradado. Por esta razón, el discurso de la mayoría de los actores transmite un sentido de impotencia en relación con las dimensiones físicas y socioeconómicas de la escasez de agua. Este mismo discurso frena la adaptación y profundiza la vulnerabilidad del socio sistema en cuanto a contaminación y sobreexplotación de acuíferos.

**Tabla 9: Síntesis AFFOM de la vulnerabilidad social asociada a la escasez en agua**

|                         | Fortalezas  | Debilidades   |
|-------------------------|---|---|
| Sistema agrícola        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dinámicas modernas (cultivos con alto valor agregados, tecnificación de los cultivos, mercados)</li> <li>- Infraestructuras administrativas de los DR</li> <li>- Iniciativas puntuales en las UR (Para mayor detalle ver secciones 3.4.2)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragilidades económicas (Desigualdades)</li> <li>- Fragilidad social (División, Tensiones y Desconfianza)</li> <li>- Fragilidad institucional (Críticas mutuas, y corrupción)</li> <li>- Fragilidad cultural (sentimientos de despojo y fatalidad, negación y tabúes de las realidades físicas tales como la contaminación en arsénico)</li> </ul> |
| Agua potable y residual | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Organización en redes</li> <li>- Iniciativas puntuales (de responsables)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragilidad institucional y social (falta de formaciones y soportes)</li> <li>- Fragilidad económica (Problemas de pagos y Desigualdad)</li> </ul>  |
|                         |   |   |

|   |   |                         |
|---|---|-------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entradas de dinero en las plantas potabilizadoras</li> <li>- Acercamientos ciencia/sociedad</li> </ul>   | Exposición a : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sequias y aridez</li> <li>- contaminación con arsénico</li> <li>- contaminación asociada a carencias en el tratamiento de aguas residuales</li> </ul>   | Agua potable y residual |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soportes para adaptación económica (tecnificación del riego)</li> <li>- Creación de redes (Sistemas Producto, label)</li> <li>- Soportes para la adaptación frente a la sobreexplotación de aguas superficiales (locales e internacionales)</li> <li>- Acercamientos ciencia/sociedad (Agricultura biológica)</li> </ul> | Tensiones (y desertificación) asociadas al despojo<br><br>Exposición a : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sequias y aridez</li> <li>- problemas ambientales de mediano y largo plazo (agotamiento de acuíferos, contaminaciones y degradaciones agrícolas)</li> </ul> | Sistema agrícola        |
| <b>Oportunidades</b>  | <b>Amenazas</b>   |                         |



## Discusiones

### 4.1 Discusión de los aportes del IPA-SIG

Los resultados obtenidos permiten alimentar la discusión respecto al IPA puesto que adaptando la metodología inicial reflejan la diversidad tanto eco-hidrológica como socio-económica del territorio chihuahuense. En el presente estudio, se adoptó la opción de Van Der Vyver (2013a, 2013b), asociando varias alternativas de componentes, con el fin de alimentar las discusiones en este tema. De hecho, Al cartografiar por un lado datos económicos y sociales de acuerdo al uso de suelo y unidades demográficas, y valorar por el otro lado la continuidad de los indicadores ambientales, aun aplicando varias estrategias de agregaciones ciertas líneas de interpretación siguen constantes:

- ✓ Las diferencias entre territorios que con centros urbanos y los que solo cuentan con zonas rurales frente a la pobreza en agua.
- ✓ La característica aguda y multidimensional de la porbeza en agua en los territorios rurales del desierto.
- ✓ La restricción relativa de la pobreza en agua de los territorios productivos comparado con los otros.
- ✓ La sobrexplotacion de acuíferos.

Estas líneas de interpretacion coinciden de hecho con la literatura especifica concernando la gestion del recurso hidrico (Lujan Alvarez, 2003; Morales & Parada, 2005; Sullivan et al., 2006) y permiten validar la coherencia global de la selección de indicadores, y diagnósticos obtenidos. En particular la racionalización de la explotación de aguas subterráneas es un tema importante en la actualidad (UNWWAP, 2015; UNESCO-IHP, et al., 2012); pero no siempre es visible en los diagnósticos pluridisciplinarios asociados al recurso agua (Vollmer et al., 2016). En este contexto, los IPA-SIG obtenidos a partir de bases de datos y análisis cartográficos presentan aportes relevantes, resaltando visualmente la sobreexplotación de acuíferos.

Es de notar que estos resultados son relevantes respecto al uso de indicadores ambientales específicos. Desde los trabajos de Sullivan, Meigh, & Fediw (2002), los problemas de disponibilidad de datos homogéneos a través del mundo limitaron las discusiones relativas a la selección de indicadores del IPA (Abraham & al., 2002; Nihila, 2012). Sin embargo ciertas tendencias que aparecen en la literatura especializada pueden ser discutidas en base a los resultados obtenidos. Rentería Flores & Pérez Arredondo (2010) por ejemplo emplea indicadores de disponibilidad del agua por habitantes en el

componente recurso. Sin embargo, éste indicador habla más de gestión que de hidrología (Fenwick, 2010). De hecho, los resultados obtenidos con estos indicadores son notablemente sensibles a factores socio-económicos y poco a factores hidrológicos y ambientales. Chihuahua siendo un estado semiárido y notablemente productivo presenta de esta manera una pobreza en agua restringida. Por lo contrario, en el presente estudio se emplean indicadores hidrológicos y ambientales específicos, siguiendo en esto la estrategia de Cullis & Gorgens (2006). Se observó al respecto que estos factores aparecen en los resultados, lo cual constituye un aporte respecto a la metodología tradicional cuyos resultados resumidos no permiten detectar estos retos específicos (Heidecke, 2006; Li et al., 2011). Consecutivamente a pesar de ser delicado el establecimiento de criterios comunes respecto a la selección de indicadores aparece relevante. Si el corpus de indicadores empleados en el presente estudio sigue siendo limitado por la disponibilidad de los datos, permite subrayar el interés del enfoque cartográfico para la elaboración de los indicadores hidrológicos y ambientales. En este sentido se señala que las herramientas SIG y análisis MCE correspondientes abren oportunidades interesantes para incluir bases de datos cartográficos y estadísticos en el cálculo del IPA.

Entre otros, uno de los aportes reside en que la normalización es mayoritariamente operada empleando umbrales significativos a nivel mundial, y con metodología que puede ser aplicada en el conjunto del territorio mexicano (para mayor detalle ver sección 3.1.3). Luego es de notar que se hizo una propuesta respecto a los indicadores ambientales e hidrológicos con el fin de racionalizar su elaboración. Sin embargo conviene aplicarla en otros territorios y compararla con otras alternativas para reforzar su validez y extender su uso. Al respecto, una ventaja del presente trabajo reside en que la metodología puede ser replicada en toda la república mexicana, lo cual favorece su comparación y discusión. Al respecto es de notar que estas limitaciones del presente estudio se pueden resolver multiplicando diagnósticos comparables puesto que es una etapa esencial de la uniformización de la metodología (Lawrence et al., 2003; Sullivan et al., 2002).

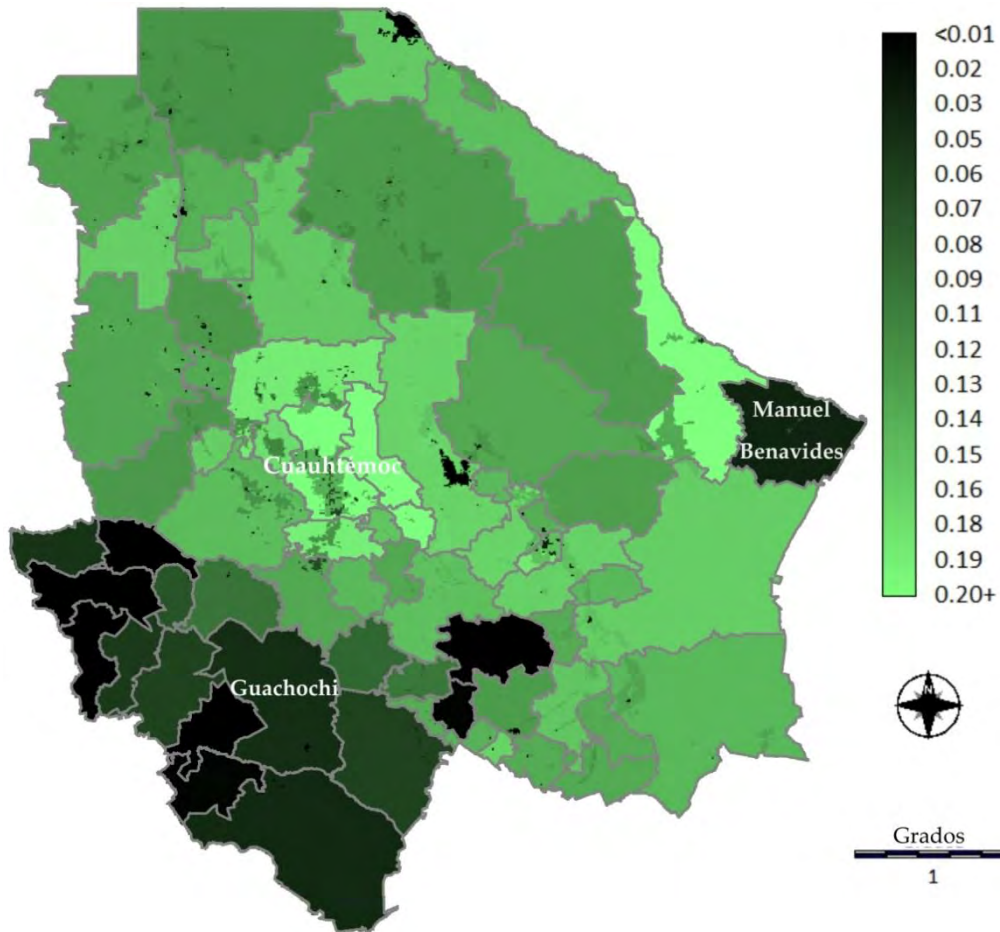
Cabe concluir que el SIG-IPA aparece interesante para detectar zonas de acción prioritarias en las problemáticas de pobreza en agua. Sin embargo los resultados siendo resumidos pueden generar malas interpretaciones, como lo menciona el (OECD & JRC, 2008) presentando las fortalezas y límites de los índices en general. En este tema es de notar que el EMC llevo a modelizar los resultados del IPA a través de varios escenarios de agregación: las diferencias existentes entre los tres mapas resultan relevantes y enriquecen la discusión concerniendo la metodología de cálculo especialmente en el contexto de ayuda a toma de decisiones.



## 4.2 Discusión de la modelización del IPA-SIG

El IPA-por-municipio, calculado a partir de la MCE evidencia variaciones asociadas a la presencia o ausencia de polos de desarrollo en los territorios municipales de Chihuahua (ciudades, actividades agrícolas o mineras). Este diagnóstico es relevante en lo que concierne al índice de pobreza en agua (Fenwick, 2010; Gong et al., 2017). No obstante, es muy clásico (Heidecke, 2006) y por sí solo constituye solo un aporte relativo. Los principales aportes del IPA-por-municipio residen por la tanto en la visibilidad que otorga a los indicadores sobreexplotación de acuíferos y recurso como ya fue señalado. Ahora bien, al valorar otras alternativas EMC, el diagnóstico evidencia otros desafíos.

En el Mapa 7 se sintetizan las diferencias entre los escenarios 1 y 2: sustrayendo el IPA-local al IPA-por-municipio. Las puntuaciones más fuertes intervienen por lo tanto cuando el IPA-por-municipio es más grande que el IPA-local; y las puntuaciones cercanas a 0 indican variaciones ligeras entre los dos escenarios. El Mapa 7 retoma las delimitaciones de tres de las cuatro unidades presentadas en el Mapa 3: áreas de riego, áreas urbanizadas (por definición no agrícolas) y áreas rurales no agrícolas.



**Mapa 8: Sustracción del IPA-por-municipio por el IPA-local**

Las áreas de temporal no aparecen, lo cual indica que obtienen aptitudes iguales en los dos escenarios y que las aptitudes de uso y acceso se compensan (lo cual no es el caso para las áreas de riego). Todas las áreas urbanas del estado obtienen puntuaciones cercanas a 0, lo cual permite identificar el impacto preponderante que tienen en los promedios municipales empleados para elaborar el IPA-por-municipio. En cambio, se observan dos comportamientos diferentes para las áreas rurales no agrícolas.

En la región de la sierra (y en el municipio rural de Manuel Benavides) las áreas rurales no agrícolas se singularizan por sus puntuaciones inferiores a 0.06, cuando en el resto del estado obtienen puntuaciones superiores a 0.12. Al adaptar la representación de los indicadores socio-económicos, el IPA-local concentra el impacto de los polos de desarrollo en los territorios correspondientes: El Mapa 8 confirma que el impacto de estos polos es fuerte en el desierto (con la excepción de Manuel Benavides), pero leve en la Sierra.

En este contexto mientras el IPA-por-municipio, solo evidencia la problemática agrícola asociada a la degradación química, el IPA-local resalta una combinación de indicadores de degradación química, uso

y acceso a riego. El hecho de que las aptitudes de las áreas agrícolas resulten globalmente inferiores a las de áreas no agrícolas confirma que las debilidades agrícolas compensan mayoritariamente sus fuerzas productivas (UNSG, 2016). Además, en todo el Estado de Chihuahua, las áreas rurales no agrícolas también presentan IPA-locales más bajos que las áreas urbanizadas. Eso remarca el carácter marginalizado de la mayor parte de los territorios rurales (UNSG, 2016). En consecuencia, el IPA-local resulta de mayor representatividad en cuanto a las problemáticas agrícola y rural. Estas aportaciones son aún más importante al confirmar que la representación cartográfica del IPA transcribe la heterogeneidad de las entidades administrativas, reforzando su relevancia y la precisión del diagnóstico (Abraham et al., 2002; Fenwick, 2010; Heidecke, 2006). No obstante, la aportación relativa a la marginalidad de los territorios rurales sigue limitada puesto que sólo tres mapas de indicadores pudieron distinguir los contextos urbanos y rurales. En este aspecto, es de notar que el problema de disponibilidad de los datos asociado a la construcción del IPA (Mlote et al., 2002), adquiere una dimensión particularmente limitante al buscar datos públicos a nivel de localidades como es el caso en el presente estudio.

Aun así, al modelar el impacto de los polos de desarrollo en los resultados (concentrando los datos urbanos y agrícolas en las áreas correspondientes de acuerdo a la Figura 7), los dos escenarios permiten resaltar diferentes territorios y problemáticas. El IPA-local registra más aptitudes inferiores o iguales a 0.48 que el IPA-por-municipio: con eso, los valores del índice poco preocupante del escenario 1 llegan a ser inquietante en el escenario 2 (Gong et al., 2017; Heidecke, 2006; Maheswari et al., 2017). Además, la jerarquización entre los IPA del desierto marginalizado y la sierra se encuentra cambiada: el IPA-por-municipio otorga mayor índice a la Sierra, mientras el IPA-local otorga mayor índice a los desiertos. Por su parte, el IPA-OWA identifica retos agrícolas y rurales similares al IPA-local, aunque haciendo más énfasis en las problemáticas de acceso a infraestructuras agrícolas (siendo mayor la diferencia de aptitud entre las áreas de temporal y las áreas no agrícolas en el Mapa 7 que en el Mapa 8). Además, sus conclusiones son distintas a las dos primeras: resalta particularmente la necesidad de preservar el escaso componente recurso. De esta manera, también subraya problemáticas consideradas como retos importantes por organismos tales como las Naciones Unidas (UNSG, 2016).

En suma, los tres mapas de resultados obtenidos representan diagnósticos resumidos de pobreza en agua. Resulta interesante que en los tres casos los desiertos concentran las mayores pobrezas en agua del Estado de Chihuahua. Pero también es de notar que cada uno enfatizando problemáticas específicas y dándoles potencialmente prioridad a diferentes estrategias de acción. Consecutivamente al combinar estos diferentes mapas se genera un diagnóstico multidimensional particularmente completo: acaba

siendo preciso y amplio sin sacrificar su carácter resumido. De esta manera asocia tanto los objetivos de resumen y claridad mencionados por Sullivan et al. (2002) en cuanto a la difusión y ayuda a toma de decisiones, como los objetivos de precisión asociados a la vulnerabilidad hídrica como lo sugiere el Atlas de vulnerabilidad elaborado por el IMTA (Arreguin Cortés & al., 2015). Además, poniendo en evidencia diferentes retos, se reduce el “efecto de verdad” asociado a la presentación de un solo mapa. Este está bien conocido de los cartógrafos quienes insisten en sus desventajas en la ayuda para toma de decisiones (Lascoumes & Le Galès, 2005). De hecho fomenta también la discusión epistemológica, lo cual constituye un aporte importante para el debatido cálculo del IPA. El presente estudio ilustra este beneficio. Al obtener resultados comparables se pudieron discutir alternativas de componentes y compensaciones adoptados para el cálculo del IPA.

Esto también confirma lo que Mlote et al., (2002) mencionó y Heidecke (2006), Abraham, et al. (2002) y Vollmer et al. (2016) repitieron: la elaboración y, desde luego, los resultados del IPA dependen del propósito de su cálculo. Ello refuerza la importancia de desarrollar un método transparente y reproducible y abre a la vez diferentes posibilidades metodologías para el cálculo del IPA. Lo cual resulta ser una fortaleza puesto que al variar los diagnósticos pueden fundamentar varias tomas de decisiones (Joerin & Musy, 2000). En este marco la aportación más relevante de la EMC reside en el hecho de que amplía el abanico de diagnósticos del IPA conservando su carácter resumido y multidimensional. Consecutivamente, diversifica las perspectivas de uso del IPA: en el caso específico aplicado, no solamente permitió resaltar y comentar diferentes retos en el Estado de Chihuahua, sino que le confirió visibilidad a nivel de análisis territorial respecto a los ámbitos rurales, y particularmente agrícolas.

#### **4.3 Discusión de los resultados del análisis social y diagnóstico interdisciplinario de vulnerabilidad asociada a la escasez en agua en la subregión de Delicias**

Se realizaron dos análisis para realizar un diagnóstico de vulnerabilidad asociada a la escasez de agua en la subregión de Delicias. Esta sección discute los resultados obtenidos en términos de vulnerabilidad social e interdisciplinaria.

Desde el punto de vista social, se ha destacado en los resultados una fragilidad institucional notable. Esta afecta particularmente la CONAGUA: la mayoría de las entrevistas restringe su perímetro de

intervención en el ámbito de la reglamentación y cabe señalar que sus estrategias de gestión son particularmente controvertidas. Estas representaciones coinciden con el diagnóstico elaborado por Paz Sanchez (2012), quien afirma : *“un análisis breve del resumen de la Ley permite advertir que el gobierno federal ha creado instancias para rehuir a su obligación de cuidar directamente el debido aprovechamiento de las aguas nacionales, toda vez que confiere ese cuidado a los usuarios de los distritos de riego, que son precisamente, y por mucho, los principales usuarios de los recursos hídricos del país”*. En términos de vulnerabilidad se concluye que existe una ruptura fuerte entre las instituciones responsables del manejo del agua y los miembros de la sociedad. Como lo señala también el Gobierno del Estado de Chihuahua (2011), esta situación es preocupante y necesitaría ser atendida puesto que contribuye a la vulnerabilidad el socio-sistema frente a los problemas de escasez en agua. Cabe añadir que la desconfianza entre instituciones y sociedad no solo afecta CONAGUA. La crítica también concierne a SAGARPA, aunque la fragilidad de esta otra institución es diferente de la de CONAGUA dado que varios productores señalan los esfuerzos de SAGARPA en cuanto a la tecnificación del riego y transformación del campo. Cabe precisar que la fragilidad institucional es un tema cultural fuerte en Chihuahua, y más generalmente en México (Gobierno del Estado, 2017; Hernandez Veleros, De la Merced, & Amador Ambriz, 2011), pero en la sub-región de Delicias, esta fragilidad está alimentada a la vez por las desigualdades económicas, el contexto transfronterizo y semiárido (para mayor detalle ver sección 2.1.2 y 3.4.1). Juntos estos factores limitan la adaptación del socio-sistema frente a escasez en agua.

Las redes promueven el desarrollo de infraestructuras y la adopción de nuevas prácticas para la purificación del agua, el tratamiento de aguas residuales y la tecnificación de riego. Esto entra en el marco de la adaptación a la escasez en agua, y constituye en este caso una « actuar político » puesto que no nada más las autoridades públicas se movilizan (Sturma, 2013). Las entrevistas también resaltan ciertos frenos al respecto: la falta de capacitación e información para el personal responsable de las plantas de tratamiento de aguas residuales y purificación del agua doméstica, así como para los usuarios del agua de quienes resulta difícil adaptar las prácticas, y por fin la falta de interés de parte de una gran parte de los productores. De hecho las dinámicas de adaptación dependen en gran mayoría de las estrategias individuales. Lo mismo para la gestión de agua potable y saneamiento en áreas rurales en el área de estudio pero también en otras partes de México (Jimenez Cisneros, 2008). Las transformaciones socioculturales son procesos lentos pero necesarios en el marco de la adaptación a la escasez de agua. Y en la sub-región de Delicias cabe mencionar que resulta todavía más lento dada la difusión de las

representaciones de fatalidad. Esto retrasa retroactivamente la adaptación a dos niveles: algunos actores se resignan (Sturma, 2013), y entre quienes se muestran dinámicos o voluntarios, muchos sostienen un discurso derrotista sobre estrategias colectivas.

Las consideraciones sociales que se acaban de mencionar se suman a las del IPA-local en la subregión de Delicias para elaborar un diagnóstico interdisciplinario de vulnerabilidad asociada a la escasez en agua. Al respecto, es de notar que para esta área de estudio el IPA retoma de manera interesante lo que se presentó del área de estudio. El Mapa 7 insiste en particular en el doble impacto de la agricultura en el socio-sistema establecido en ámbito semiárido:

- ✓ Impacto negativo en la exposición frente a la escasez en agua (sobreexplotación de acuíferos) ;
- ✓ Impacto positivo en las fragilidades económicas y desarrollo social consecutivo (educación, infraestructuras de agua potable, saneamiento).

Al contrario, el análisis de discursos explica en cierta medida la sobreexplotación de acuíferos pero no permite evidenciarla y mucho menos comprobarla. Ahora bien, considerando el tema de la tecnificación, resulta que el análisis estadístico no permite vislumbrar la diversidad existiendo en las prácticas como lo hace el análisis social. En este sentido, aparece que mientras el IPA evidencia problemas de aridez, el análisis social evidencia problemas y repercusiones asociadas a la sequía. En suma, los dos análisis se completan respecto a estas temáticas. Y resulta también que los dos análisis evidencian desigualdades, pero cada uno a su manera: el IPA enfoca la diferencia de desarrollo entre ciudades y territorios rurales, mientras que el análisis social evidencia diferencias entre los productores. Asociando enfoques cuantitativos y cualitativos se obtienen pues dos perspectivas complementarias (Berthier, 2006; Kauffmann, 2011). Estas consideraciones confirman que asociar diferentes escalas y métodos de análisis permite abordar las diferentes dimensiones de las vulnerabilidades asociadas con la escasez de agua y elaborar un diagnóstico detallado (Becerra, 2012).

Cabe limitar estas aportaciones puesto que la asociación de los tres métodos (cálculo de índice, cartografía y análisis social) no permite alcanzar la exhaustividad recomendada por Birkmann et al. (2013) en el contexto del apoyo a la decisión. En particular, los resultados siguen limitados por el tabú que existe respecto a la calidad, como es el caso de la presencia de arsénico. El IPA-SIG por sí solo no permite detectar esta problemática e solo insiste indirectamente en los temas de contaminación del agua, eso a pesar de que el método haya sido adaptado con la intención de enfocar estas problemáticas (para mayor detalle ver sección 2.3.3). En el caso del análisis social cualitativo, a través de los silencios (para

mayor detalle ver sección 2.5.2), interrogaciones (y hasta miedos) expresados respecto a este tema, se dio a ver su carácter problemático, pero por estas mismas razones los resultados son limitados. El hecho de que las dos metodologías evidencien tabúes en estos temas refuerza ambos resultados, y resalta las interrogaciones acerca de la colaboración entre ciencia y sociedad, el apoyo a la toma de decisiones y los acercamientos entre disciplinas científicas (Prud'homme & Gingras, 2015).

La presente investigación confirmó que los problemas ambientales y sanitarios de largo plazo se comentan poco fuera de los ámbitos científicos:

- ✓ No siendo tan accesibles los datos de contaminación de agua ni de aguas subterráneas como lo son los datos socio-económicos;
- ✓ Y cobrando las formas de tabúes e interrogaciones en los discursos de actores.

En este sentido también se dio a ver que las racionalidades económicas predominan en las estrategias de adaptación: fomentan la tecnificación del riego, e impactan de manera significativa las prácticas vinculadas con la potabilización del agua. Además esta misma racionalidad acelera la remediación de las aguas residuales (por las negociaciones emprendidas entre los agricultores y las autoridades municipales). En paralelo, el análisis social reafirmó la importancia de la comunicación respecto a los factores físicos de escasez de agua, los cuales no siempre son visibles en sí (Urquiza Gómez & Cadenas, 2015). En Delicias esta comunicación pareció limitada de tal manera que se genera un mito de la abundancia, el cual alimenta un sentimiento de despojo y refuerza conjuntamente las tensiones locales y degradaciones antrópicas del recurso. Varios estudios demostraron que la comunidad científica necesita desarrollar estrategias de difusión específicas (comunicaciones y colaboraciones) para que sus propuestas sean adoptadas por los actores sociales (Albuquerque Llorens, 2008; Heijs, 2001). Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos desarrollados en este sentido se enfocaron a innovaciones con fines comerciales y pocos fueron enfocados a innovaciones sociales como son las transformaciones orientadas hacia la salud y el medioambiente (Echeverría, 2008). La presente investigación sugiere que estos temas son relevantes elaborar un diagnóstico operativo en cuanto a la vulnerabilidad frente a eventos socio-naturales como la escasez física en agua.





## Conclusiones

- Las bases de datos publicadas en México presentan carencias: los datos publicados no siempre corresponden a los que se suelen usar a nivel internacional (por ejemplo a nivel municipal se publica el ICTPC en vez del PIB per cápita), y faltan informaciones respecto a la calidad del agua (monitoreo del arsénico y flúor, contaminación agrícola...). Frente a estas carencias la comunidad científica necesita desarrollar estrategias específicas: este trabajo indica por ejemplo que el uso de datos cartográficos proporciona los elementos para incluir la interdisciplinariedad del IPA y refuerza en cierta medida la uniformización del método.
- La estandarización de los indicadores del IPA mediante el método Fuzzy y a partir de datos públicos se puede aplicar en cualquier lugar de México y constituye una base para reflexiones en otros lugares.
- Las fortalezas (síntesis) y debilidades (claridad) del IPA calculado a través de las herramientas SIG son comparables a las obtenidas a través de métodos estadísticos. No obstante, cabe destacar algunas aportaciones desde el punto de vista de la representatividad territorial y la presentación de los resultados, puesto que la representación cartográfica de los resultados permite distinguir variaciones intra-municipales (en particular respecto a la sobreexplotación de acuíferos y las actividades agrícolas)
- Los mapas obtenidos distinguen varias pobreza en agua en el territorio de Chihuahua: tres entidades geográficas se identifican con mayor o menor visibilidad, según las escalas de cálculo y métodos de agregación implementados.
- De la misma manera que en la tradición estadística, la interpretación de los resultados cartográficos es mucho más relevante y precisa al asociar varios niveles de resultados.
- Una de las contribuciones más notables de este estudio radica en el hecho de demostrar que las alternativas ofrecidas por la EMC permiten desarrollar diferentes diagnósticos del IPA, siendo cada uno relevante en su ámbito, y esto, conservando operaciones uniformes y transparentes. En

el caso de Chihuahua, el IPA-por-municipio destaca el dinamismo socio-económico de los municipios productivos, mientras que el IPA-local insiste en las diferencias entre ámbitos rurales y urbanos, y el IPA-OWA resalta las problemáticas de acceso a riego y contaminaciones agrícolas.

- Se demostró que: La operación concreta del riego es un proceso complejo y genera tensiones entre los productores y desconfianza hacia las instituciones responsables del manejo hídrico. Estas tensiones se agudizan por las coyunturas internacionales y las condiciones hidrológicas arduas. Esto acaba reforzando la escasez en agua y orientando las representaciones sociales.
- Las representaciones sociales de la escasez en agua y las prácticas locales están marcadas por la experiencia de la sequía pero también por un sentimiento de injusticia. Por otro lado, la visibilidad de los problemas cualitativos es limitada, y los usuarios agrícolas incluso dudan de la realidad del agotamiento de los recursos subterráneos.
- En el contexto de altas demandas de agua en un contexto semiárido, el análisis ha demostrado que la adaptación se opera más que nada en relación con las racionalidades económicas.
- En lo que concierne a los problemas ambientales y sanitarios cuyas expresiones implican largos períodos de tiempo, los límites y la lentitud de la transformación de las prácticas son más notables que en el caso de problemas socioeconómicos. En este contexto la comunidad científica adquiere un papel de denunciante y se reactivan las interrogaciones respecto a la transformación de las prácticas de acuerdo a las sugerencias científicas.
- Los dos análisis (IPA-SIG y AFFOM) coinciden en un tabú: el de la presencia de arsénico y flúor en el caso del agua potable (y globalmente el de la contaminación del agua para los diferentes usos).
- Finalmente, la combinación de diferentes escalas y métodos de análisis interdisciplinarios, como los realizados en el presente estudio, hacen posible abordar las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad asociada con la escasez en agua.



**Thèse en Français :**

**Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une  
approche interdisciplinaire : application cartographique de l'IPE et  
étude de discours dans l'Etat de Chihuahua (Mexique)**

## **Introduction générale**

Alors que les *Sustainable Development Goals*<sup>6</sup> (SDG) définis par l'eau de l'Organisation des Nations Unies (UN d'après son sigle anglais) attirent l'attention sur les enjeux sanitaires, économiques et environnementaux associés à la gestion de l'eau, les chiffres communiqués dans les divers rapports de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), de la FAO ou encore de l'UNICEF ne sont pas rassurants sur les menaces pesant sur la ressource en eau, menaces dénoncées maintenant depuis plus de 30 ans. En 2050, la disponibilité en eau diminuera dans certaines parties du monde, menaçant la sécurité alimentaire et les moyens d'existence<sup>7</sup>. Dans certaines régions, le changement climatique aura un impact majeur sur les disponibilités en eau pour l'agriculture et sur la productivité des cultures au cours des prochaines décennies<sup>8</sup>. En 2050, toujours, il y aura assez d'eau pour produire la nourriture nécessaire à l'alimentation de la population mondiale qui dépassera les neuf milliards, mais la surconsommation, la dégradation des ressources et l'impact du changement climatique<sup>9</sup> réduiront la disponibilité en eau dans de nombreuses régions, en particulier dans les pays en développement<sup>10</sup> ; situation pouvant à terme générer des tensions et des conflits<sup>11</sup>.

Au Mexique notamment, les ressources sont très fortement altérées tant quantitativement que qualitativement. Les problématiques de pénurie en eau au Mexique ont été abordées dès le début des années 2000, et se trouve d'ailleurs au cœur du plan national hydrique 2014-2018. Le dernier plan national hydrologique parle d'ailleurs de « brèche hydrique » entre l'offre et la demande (CONAGUA, 2014). A ce sujet, il faut signaler que la demande agricole représente 80 % de la demande totale actuelle, 63 % de cette eau est d'origine de surface malgré cela les réserves souterraines diminuent de 6,5 mil hm<sup>3</sup>/an. Face à ce constat le plan hydrique tire la sonnette d'alarme face à la surexploitation et aux coûts écologiques.

---

<sup>66</sup> « Objectifs de Développement Durable ».

<sup>7</sup> 4 avril 2015, Rome/Daegu [www.fao.org/news/story/fr/item/283271/icode/](http://www.fao.org/news/story/fr/item/283271/icode/)

<sup>8</sup> 9 juin 2011, Rome - <http://www.fao.org/news/story/fr/item/79968/icode/>

<sup>9</sup> « Chaque degré supplémentaire devrait réduire de 20 % les ressources en eau » affirme le rapport. 5ème rapport 2014 ; le rôle du changement climatique sur le cycle de l'eau a largement été souligné dans les divers rapports du GIEC de 1990, 1995, 2001, 2007 et 2014 bien que les incertitudes demeurent nombreuses quant aux impacts et rétroactions.

<sup>10</sup> 4 avril 2015, Rome/Daegu [www.fao.org/news/story/fr/item/283271/icode/](http://www.fao.org/news/story/fr/item/283271/icode/)

<sup>11</sup> Frédéric Lasserre, « Le partage de l'eau dans le monde : un enjeu majeur du XXI<sup>e</sup> siècle », *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 36-2 | 2006, 171-183.

Il faut souligner que cette situation est le résultat de la politique hydrique et hydroagricole conduite par le Mexique depuis les années 1930 à travers le développement de grands programmes d'irrigation menés par le gouvernement et ses institutions successives : *Comisión Nacional de Irrigación*<sup>12</sup> (1926-1946), *Secretaría de Recursos Hidráulicos*<sup>13</sup> (1947-1976), *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos*<sup>14</sup> (1977-1989) ou *Secretaría de Recursos Hidráulicos*<sup>15</sup> a través de la *Dirección de Agrología*<sup>16</sup> (1970). Ces politiques ont conduits au développement d'une agriculture irriguée même dans les régions les plus arides du Mexique, générant ainsi une dépendance à la ressource en eau en vue d'assurer les productions (Kauffer, 2006). Ces problématiques se sont accrues ces dernières années avec la répétition des sécheresses et la concentration de l'économie sur les ressources d'origine agricoles. Dans ce contexte, les ressources en eau sont dégradées quantitativement, mais aussi qualitativement par les activités anthropiques qui génèrent des pollutions ou exacerbent des problèmes de qualité naturelle. De fait, la moitié de la population habitait en 2002 dans des régions avec des eaux superficielles contaminées (Avila Garcia, 2005). Et l'exploitation d'eau chargée en arsenic ou fluor pose aussi question<sup>17</sup>.

Ces problématiques de pénuries en eau sont fortes dans les zones intertropicales arides et semi arides du nord Mexique, qui sont particulièrement affectés par le changement climatique (altérations du cycle de l'eau et des réservoirs) d'une part, et par une dégradation ou une exacerbation de la dégradation de la qualité des aquifères (en particulier du fait de la présence de fluor et arsenic sur une grande partie du territoire mexicain dont Chihuahua) d'autre part. L'Etat de Chihuahua a ainsi subi une forte récurrence de sècheresses mettant les populations en difficulté depuis la fin du siècle passé (cette problématique est présentée dans la Section 2.1). Quant aux problèmes liés à la dégradation des aquifères, ils y sont d'autant plus sensibles qu'ils renforcent les contaminations de ces ressources et soulèvent d'importantes interrogations sanitaires<sup>18</sup>. Et encore faut-il ajouter que les intérêts locaux s'associent à des intérêts

---

<sup>12</sup> « Commission Nationale d'Irrigation ».

<sup>13</sup> « Ministère de Ressources Hydrauliques ».

<sup>14</sup> « Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques ».

<sup>15</sup> « Ministère de Ressources Hydrauliques ».

<sup>16</sup> « Direction d'Agrologie »

<sup>17</sup> [www.fao.org/ag/fr/magazine/0605sp1.htm](http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0605sp1.htm)

<sup>18</sup> Voir <http://archivo.eluniversal.com.mx/cultura/65668.html>, 16 juin 2011 ou Vidsupra vol 3, n°2, 2011 EFECTOS A LA SALUD POR LA INGESTA CRÓNICA DE ARSÉNICO EN AGUA. MARCADORES RAPD, HERRAMIENTA PARA LA

nationaux et internationaux étant donné la contribution de cet état aux productions agricoles nationales d'une part, et l'intégration de l'Etat dans le Traité International des Limites et des Eaux (TILA) d'autre part.

Ces situations de pénuries quantitatives ou qualitatives génèrent des vulnérabilités. Ce concept de vulnérabilité à l'eau découle de la notion de risque, qui associe un aléa potentiellement menaçant (sécheresse, pollution, ...) et d'enjeux notables pour la société ou les individus (alimentation en eau potable, santé, récoltes, productions industrielles,...). Face à une vulnérabilité, diverses stratégies peuvent être observées (Becerra, 2012 ; Becerra et Peltier, 2009): résister, faire preuve de résilience, s'adapter, ou encore fuir. Lorsqu'elles sont confrontées à un changement, les sociétés et les individus changent leurs stratégies et leurs pratiques en fonction de leurs diverses rationalités, soit ce que l'on qualifie d'adaptation. En ce qui concerne les pénuries en eau en l'occurrence les deux stratégies les plus notables sont l'adaptation (transformation des infrastructures) et la fuite (désertification) (FAO, 2012; United Nations, 2008). Dès lors, les diagnostics acquièrent une importance toute particulière pour orienter l'adaptation et éviter la désertification.

Au Mexique, plusieurs transformations de la gestion de l'eau sont allées dans le sens de l'adaptation tout au long du siècle passé. Les grands programmes hydrauliques et hydroagricoles des années 1930 rentrent dans ce cadre, avec la formation des *Distritos de Riego (DR)*<sup>19</sup> dont les spécificités sont détaillées et discutées dans les Sections 2.1 et 2.5 et 3.4. Et dans un autre domaine, le statut de *Zonas de Veda*<sup>20</sup> définies par la *Ley de Aguas Nacionales* (LAN) adoptée en 1992 a été créé pour contrôler et réglementer les captages dans les nappes en vue de limiter leurs dégradations. Enfin, il est notable que la LAN inscrit la gestion de l'eau dans des approches par bassins versants à travers la création de *Consejos de Cuencas*<sup>21</sup> et de *Comités Técnicos de Aguas del Subsuelo y Subterráneas*<sup>22</sup>. Malgré ces mesures, les

---

DISCRIMINACIÓN ESPECÍFICA EN EL GÉNERO ZEA. Norma Almaraz-Abarca, Diana María Rivera-Rodríguez<sup>1</sup>, Jesús Sánchez- González<sup>2</sup>, Amanda Delgado-Alvarado, Luis Gerardo Barriada-Bernal, Alfonso Reyes-Martínez<sup>1</sup>, José Roberto Medina-Medrano<sup>1</sup>, José Antonio Ávila-Reyes, José Natividad Uribe-Soto, Jesús Herrera-Corrall, Néstor Naranjo-Jiménez.

<sup>19</sup> « Districts d'Irrigation ».

<sup>20</sup> Il n'existe pas de traduction littérale pour la formule *Zona de Veda* : elle fait référence à l'interdiction légale de créer de nouvelles extractions d'eaux souterraines (Estados Unidos Mexicanos, 2011).

<sup>21</sup> « Conseils de Bassins Versants »

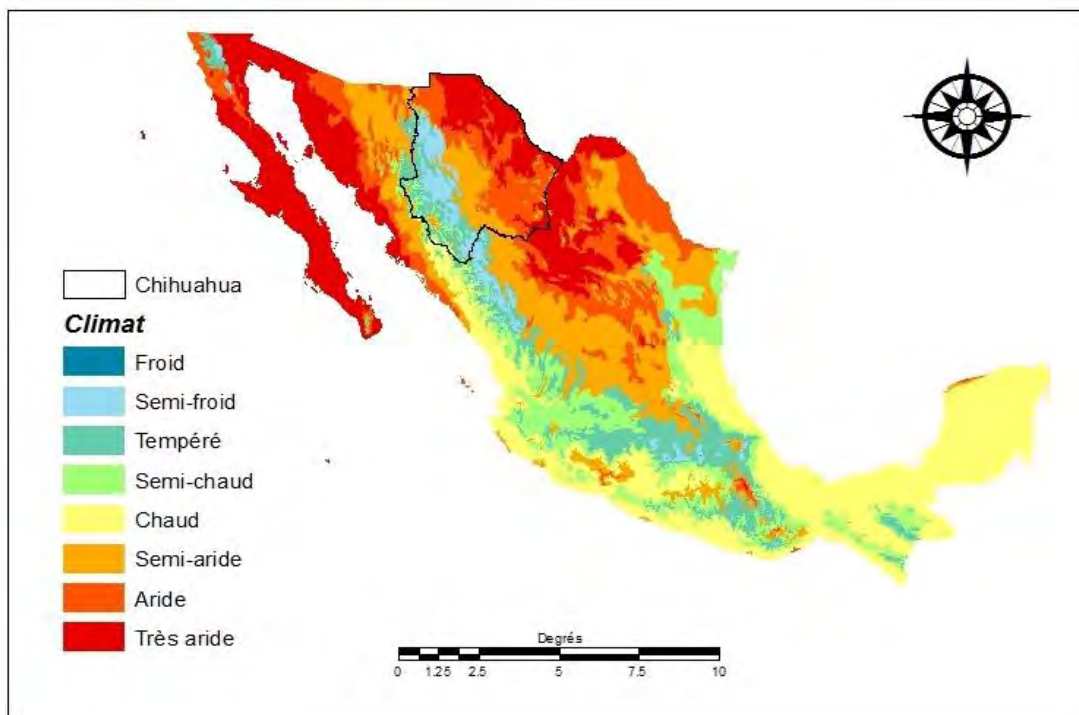


bilans établis à l'orée du XXI<sup>ème</sup> siècle (comme celui déjà signalé du Plan National Hydraulique) indiquent que les problématiques de pénuries en eau perdurent et tendent même parfois à se renforcer. Dans ce cadre, il est d'autant plus important de réaliser des diagnostics qui prennent en compte les facteurs hydrologiques et socio-économiques, mais aussi les capacités d'adaptation de la société.

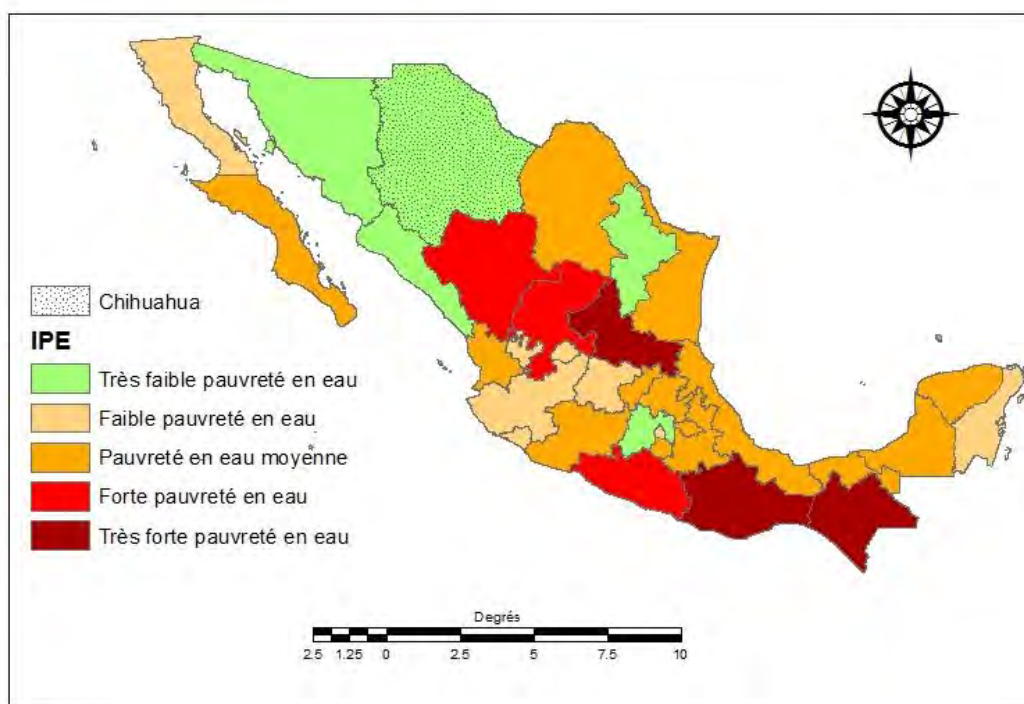
Or les diagnostics concernant l'eau sur le territoire mexicain, et en particulier dans l'Etat de Chihuahua sont non seulement multiples mais surtout divergents. Ainsi, la Carte 1 qui donne à voir les climats du Mexique indique un contexte semi-aride à aride dans cet état, ce qui laisse entendre que l'eau y est rare, et son accès stratégique voire difficile. Au contraire, la Carte 2 qui représente la pauvreté en eau des différents Etats (fédérés) de ce pays signale que la pauvreté en eau est très faible dans l'Etat de Chihuahua. Tandis que la première carte repose sur des facteurs physiques qui semblent défavorables pour cet Etat, la seconde repose sur des facteurs socio-économiques qui pour leur part le favorisent (Section 1.3). Afin d'adopter des stratégies d'adaptations (et aider la prise de décision) il serait intéressant d'associer ces deux types de facteurs dans un seul diagnostic. Cela constitue néanmoins un défi méthodologique de taille puisqu'il convient d'associer des analyses en provenance de plusieurs disciplines.

---

<sup>22</sup> « Comités Techniques d'Eau des Sous-sols et Souterraines »



Carte 1 : Chihuahua, un état aride du nord du Mexique, adapté de (CONABIO, 2012)



Carte 2 : Résultats de l'IPE calculé au Mexique par Rentería Flores et Pérez Arredondo (2010)

En outre, si à l'échelle de l'Etat (dite *estatal* en espagnol), la littérature spécialisée s'accorde sur les dynamiques économiques remarquables du territoire *chihuahuense* (c'est-à-dire de l'Etat de Chihuahua), ce succès est plus nuancé dans les analyses menées à des échelles plus fines (Section 2.1). De fait, les capacités d'adaptation varient sur le territoire, et génèrent des inégalités sociales et des tensions (Angélie-Descamps & Alarcón-Herrera, 2015; Quintana S., 2009).

Cette étude interroge par conséquent les outils de diagnostics employés pour opérer des analyses relatives aux pénuries en eau. Elle se penche en particulier sur les démarches interdisciplinaires vouées à l'aide à la prise de décision. Il s'agit en particulier de réaliser un diagnostic de vulnérabilité associé aux pénuries en eau à des échelles municipales dans l'Etat de Chihuahua.

**Partie 1 : Diagnostics des vulnérabilités liées aux pénuries en eau : définitions et outils**

## **1.1 Vulnérabilités et pénuries en eau : définitions et applications pour l'aide à la prise de décision**

La question de départ de cette étude peut être formulée de la manière suivante : Comment associer les dimensions hydro-climatologiques et socio-économiques dans un même diagnostic qui puisse aider les prises de décisions associées à la réduction des vulnérabilités liées au manque d'eau dans l'Etat de Chihuahua, Mexique ?

Dans le cadre de cette réflexion, le concept de pénurie en eau s'avère utile puisqu'il repose sur une définition multidimensionnelle de l'accès à l'eau (Section 1.1.1). Cela en fait un objet d'étude complexe, mais l'impact des pénuries d'eau sur la société est tel qu'il mobilise entre autres l'Organisation des Nations Unies (UN d'après le sigle anglais). Réduire cet impact constitue de fait un enjeu majeur pour la société et les individus qui la composent ; à cette fin, la phase de diagnostic est centrale puisqu'elle détermine les périmètres d'action. En parallèle, le concept de vulnérabilité établit que ces périmètres d'action sont variés et dépendent de l'exposition des sociétés (en l'occurrence à la pénurie en eau) mais aussi de leurs propres fragilités et capacités (Section 1.1.2). Pour appréhender ces dynamiques notablement variées, l'étude de la vulnérabilité tend à remettre en cause les cadres disciplinaires.

Dans le cadre de l'aide à la prise de décision face aux pénuries en eau, il est intéressant de synthétiser les diagnostics de pénuries et de vulnérabilité, même si l'entreprise est vaste et compliquée. Aujourd'hui, les indices constituent une alternative méthodologique de plus en plus employée afin de réaliser des diagnostics multidimensionnels et interdisciplinaires (Section 1.1.3). La littérature scientifique qui fait référence aux opportunités de cette méthode, signale aussi certaines de ces limites dans le cas particulier des études de vulnérabilité. Les défis méthodologiques sont donc nombreux, mais intéressants et importants à aborder pour tenter de réduire les vulnérabilités associées aux pénuries en eau. Cette section définit le cadre théorique de l'étude et présente les fondements de la réflexion méthodologique appliquée ici dans l'Etat de Chihuahua (Mexique).

### *1.1.1 Pénuries en eau : une problématique multidimensionnelle*

La pénurie correspond au manque de ce qui est nécessaire (Fenwick, 2010). L'eau étant une ressource vitale pour l'homme et pour la reproduction socio-économique des sociétés, la pénurie en eau peut donc être définie comme une situation dans laquelle les ressources en eau sont insuffisantes sur un territoire donné pour répondre aux demandes en eau des populations (Chenoweth, 2008 ; Fenwick, 2010). Dans le contexte de changement global, d'accroissement de la demande liée à la démographie et aux nouveaux modes de consommations ainsi qu'à l'altération des ressources superficielles et d'épuisement des ressources souterraines, il s'agit d'un important sujet d'actualité depuis la fin du siècle passé (Seckler, et al., 1998 ; Vörösmarty, et al. 2000).

- Ressource en eau et reproduction sociale : la pénurie en eau au cœur d'enjeux sociaux, économiques et environnementaux

Howard et Bartram (2003) rendent compte de l'importance vitale de l'eau à travers un constat simple : « *Without water, life cannot be sustained beyond a few days and the lack of access to adequate water supplies leads to the spread of disease*<sup>23</sup> ». De cette manière, ils mettent en évidence l'impact des réserves d'eau sur la santé des populations. Cet impact est double : il faut de l'eau en quantité suffisante pour subvenir aux besoins de consommation directe du corps, mais les réserves d'eau permettent aussi d'éviter les maladies. A ce sujet, Howard et Bartram (2003) dressent une liste des usages domestiques de l'eau proche de celle de Gleick (1996) : outre la consommation directe, l'eau sert pour la cuisine, pour la toilette et pour le ménage. L'étude de Howard et Bartram (2003), commanditée par l'OMS, a posé les jalons des réflexions systématiques sur les besoins d'approvisionnement en eau. Avec le temps, la terminologie adoptée pour parler de ces besoins a évolué, tout en faisant référence aux mêmes usages : les textes de l'OMS/UNICEF (2017) parlent d'eau de boisson, d'hygiène élémentaire et d'assainissement<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> « Sans eau, la vie ne peut durer plus de quelques jours et le manque d'accès à des réserves d'eau adéquates mène à l'explosion de maladies ».

<sup>24</sup> « Une seule dimension de l'étude d'Howard et Bartram (2003) n'a pas été conservée comme telle dans les approches concernant les usages domestiques : l'importance socio-économique de l'eau dans les contextes de pauvreté (Section 2.4.1) ».

En parallèle, les usages économiques de l'eau constituent des piliers forts de la reproduction socio-économique des sociétés humaines. L'eau est une matière première fondamentale pour la production agricole : « A l'heure actuelle, l'agriculture est responsable de 70 pour cent des prélèvements en eau douce dans le monde, et de plus de 90 pour cent de son utilisation non renouvelable » (FAO, 2012). Dans ce cadre, l'eau joue deux rôles concomitants pour la reproduction sociale : elle supporte l'économie des secteurs d'activités primaires, et elle a une place essentielle pour la sécurité alimentaire des sociétés. En outre, comme solvant universel, l'eau sert aussi dans de multiples étapes des productions industrielles, lesquelles sustentent les modèles de développement qui s'imposent actuellement à travers le monde. Les études concernant l'eau virtuelle<sup>25</sup> et les empreintes hydriques<sup>26</sup> ont ainsi contribué à insister sur les volumes d'eau nécessaires dans les circuits industriels (Hoekstra, et al., 2011 ; Velázquez, 2010).

Enfin, l'eau joue un rôle fondamental dans les cycles et les dynamiques environnementales (Enrique J., et al., 2013). Or, ces cycles comportent des aspects bénéfiques pour la reproduction sociale (MEA, 2005) : l'environnement supporte ainsi les productions agricoles (par la régénération des sols et la régulation du climat par exemple), et ils approvisionnent les hommes en matières premières (comme le fuel, le bois et l'eau) en même temps qu'ils jouent un rôle culturellement parlant. Ces contributions bénéfiques de l'environnement pour les sociétés sont appelées services écosystémiques (Couvet, 2015). Le concept a été développé dans les sciences biophysiques, mais il s'agit d'une notion implicite ancienne (Muxart et al., 2003) : de longue date les services écosystémiques d'approvisionnement<sup>27</sup> ont servi de base matérielle aux sociétés humaines. Dans le cas de la ressource en eau, Muxart et al. (2003) relèvent les services des zones humides qui régulent les débits ou épurent les eaux : alors qu'au XIXe siècle elles étaient considérées comme impropres à l'agriculture et sources de maladies, il est avéré

---

<sup>25</sup> Le concept d'eau virtuelle évalue l'eau qui entre dans le processus de production des biens qu'on consomme, concept introduit par Allan en 1996 (Roch et Gendron, 2005).

<sup>26</sup> L'emprunte hydrique, basée sur le même principe que l'emprunte carbone, est le volume total d'eau virtuelle utilisée pour produire un produit ou un service. « Ce recours à la métaphore pédagogique de l'« empreinte », créée en 1992 par Mathis Wackernagel et William Rees en tant qu'outil censé évaluer la pression exercée par un groupe sur un autre groupe ou une zone » (Sayhi, 2012).

<sup>27</sup> Les « services environnementaux », sans attribuer une valeur mercantile aux ressources de la nature montrent que celle-ci peut également être vue comme une forme de capital d'une importance majeure (Sayhi, 2012).

aujourd'hui qu'elles jouent des fonctions essentielles en termes de filtration des eaux et d'atténuation des extrêmes hydrologiques. Quant aux services culturels autour de l'eau, ils s'appuient par exemple sur des savoirs anciens et des pratiques rituelles. D'après Wegner et Pascual (2011), les services écosystémiques sont d'ailleurs encore sous-estimés.

En somme, en plus des enjeux sanitaires, l'eau est aussi au cœur d'enjeux sociaux-économiques et environnementaux. Or, ces différents usages peuvent entrer en compétition car ils font varier la quantité et la qualité des réserves d'eau disponibles. Ces variations suscitent de fait des perturbations économiques et environnementales, lesquelles peuvent engendrer des tensions sociales, et dans les cas extrême des crises sanitaires (Del Castillo, et al., 2009 ; Falkenmark, 1989 ; Kauffer, 2006) ou des conflits géopolitiques (Descroix et Lasserre, 2007 ; Lasserre, 2007). Face à ce constat Winpenny (1997) définit la pénurie d'eau de la manière qui suit : « Le point auquel les répercussions agrégées de tous les utilisateurs a un effet préjudiciable sur l'approvisionnement en eau ou la qualité de l'eau dans le cadre des dispositions institutionnelles en vigueur, au point que la demande de tous les secteurs, dont l'environnement, ne peut être entièrement satisfaite » (in FAO, 2012). Cette définition, reprise par les organismes internationaux (FAO, 2012 ; UN-WWAP, 2009), insiste sur le fait que la pénurie en eau est un objet d'étude multidimensionnel. De fait, un axe de recherche s'est développé autour des causes et des dynamiques de pénuries qui s'avèrent être multiples et interdépendantes (Abrams, 2009).

- Facteurs de pénurie en eau et socioécosystème

Les travaux de Falkenmark (1986, 1989) sont considérés comme les fondements des études de pénurie en eau (Fenwick, 2010). Cette auteure s'intéressait à deux dynamiques concomitantes : la réduction quantitative des ressources en eau, et l'accroissement des demandes (Seckler, et al., 1998 ; Vörösmarty, et al., 2000). Mais depuis d'autres facteurs ou causes de pénurie en eau ont été mis en évidence (Buchs, 2010).

Dans un premier temps il est apparu que la pénurie d'eau « varie dans le temps du fait de la variabilité hydrologique » (FAO, 2012). Le fameux cycle de l'eau, qui caractérise cette ressource, comprend des dynamiques spatiales et temporelles qui font varier les quantités d'eau disponibles à un moment donné sur un territoire donné (Enrique J. et al., 2013). Or, sous l'effet du changement climatique et des



pratiques d'extractions anthropiques, les variations qui tournaient autour d'un point d'équilibre tendent de plus en plus à réduire les quantités d'eau disponibles : baisse des nappes phréatiques, épuisement des nappes fossiles, réduction des réservoirs constitués par les glaciers, réduction ou disparitions de grands réservoirs superficiels tels que certains grands lacs, etc. En outre, viennent s'ajouter à cela des dégradations qualitatives des masses d'eau : « au fur et à mesure que l'utilisation de l'eau s'intensifie, les fonctions de dilution et de purification des écosystèmes aquatiques atteignent leurs limites, ce qui se traduit par une accumulation des polluants » (FAO, 2012). Ces processus réduisent la disponibilité de l'eau pour les usages mentionnés précédemment, c'est pourquoi Shiklomanov (2000) mais aussi les *United Nations* (2017) incluent ces dégradations parmi les facteurs de pénurie en eau. Or, il faut noter que la quantité et la qualité des ressources en eau varient en fonction de dynamiques naturelles « mais encore plus en fonction des politiques et stratégies de planification et de gestion économiques » (FAO, 2012). Autrement-dit les sociétés humaines sont elles-mêmes des créatrices de pénurie en eau.

A ce sujet, Ohlsson et Turton (1999) ont démontré que la pauvreté, comprise dans une perspective multidimensionnelle, joue un rôle prépondérant dans la construction de la pénurie en eau. Pour mener cette réflexion, ils s'inspirent des travaux développés sur les capacités par le prix Nobel d'économie 1998, Amartya Sen (Flipo, 2005). Celui-ci définit la pauvreté en fonction des capacités d'action des individus ou des sociétés, lesquelles « découlent de la conversion des potentialités des personnes (dotations en capitaux monétaire, physique, humain et social), via les opportunités (issues du marché, de l'action publique, de la société civile) qu'elles parviennent à saisir au cours de leur existence » (Lallau, 2008). Dans cette approche, la pauvreté correspond à des manques de capitaux qui peuvent être financiers, matériels mais aussi socio-culturels. En outre, il est notable que la pauvreté est également déterminée par des facteurs conjoncturels : tels que les lois du marché ou bien encore le contexte institutionnel. Ohlsson et Turton (1999) en retiennent que la pauvreté est fonction des capacités des individus, lesquelles sont formées par des capitaux qui leur sont propres, mais aussi par d'autres facteurs (notamment institutionnels) qui leur échappent. Or la mobilisation de ces capacités, permet de réduire la pénurie en eau d'un individu ou d'une société donnée, notamment au moyen du développement d'infrastructures qui sont pour leur part matérielles. Comme Seckler et al. (1998), les auteurs concluent alors que la pénurie en eau est, elle aussi, multidimensionnelle. Pour l'étudier, il convient dès lors d'analyser des facteurs structurels et économiques en plus d'observer les variations physiques de la ressource. Cela conduit à distinguer deux types de pénuries (Ohlsson et Turton, 1999) :

- ✓ la pénurie de « premier ordre » dépendant des facteurs hydro-climatologiques ;

- ✓ la pénurie de « second ordre » qui fait référence aux infrastructures hydrauliques et aux aspects socio-économiques et institutionnels qui favorisent ou empêchent l'accès à l'eau.

Cette approche a été reprise notamment par Allan (2001) et évoquée par Sullivan et al., (2002). Néanmoins, si elle permet de discuter le concept de pénurie en eau, elle reste limitée pour appréhender les interactions existant entre ces différents types de facteurs. Or, ceux-ci ont une influence décisive sur les pénuries en eau. A titre d'exemple, les technologies hydrauliques transforment l'hydrosystème tout en étant fondamentalement liées aux stratégies – publiques ou privées – de gestion de l'eau. Ainsi, « *la intrincada relación entre medio ambiente y sociedad ha sido abordada desde múltiples perspectivas, sin embargo, las más importantes y productivas han sido aquellas provenientes de las tradiciones sistémicas*<sup>28</sup> » (Urquiza Gómez et Cadenas, 2015).

La notion de *socioécosystème*, trouve ici sa place, permettant d'articuler les pénuries des deux ordres. En effet, s'appuyant sur des concepts d'interactions et de rétroactions caractéristiques des approches systémiques (Donnadieu, et al., 2003 ; Durand, 1979), « la modification d'une entité du système (individu, exploitation agricole, population animale...) a des impacts sur d'autres entités, qui en retour affectent cette première entité » (Muxart et al., 2003). Les deux entités en jeux sont d'une part les sociétés, et d'autre part les écosystèmes, en l'occurrence les hydrosystèmes. L'analyse d'un socioécosystème revient donc à déterminer les diverses influences des sociétés sur les éco(hydro)systèmes et celles des éco(hydro)systèmes sur l'organisation et le fonctionnement des sociétés, en d'autres termes leurs interactions (Berkes et Folke, 1998). Cette approche est particulièrement intéressante pour l'étude des pénuries en eau qui sont issues d'interactions entre des facteurs hydrologiques, mais aussi environnementales et socio-économiques (Sullivan et al., 2002).

D'ailleurs, il faut aussi noter que le socioécosystème est un système dit complexe. De fait, les écosystèmes « *results from the nonlinear interactions among a large number of system components which frequently lead to emergent properties, unexpected dynamics, and characteristics of self-organization* » (Jianguo et John, 2002). Et il en est de même pour les sociosystèmes. Les interactions existant entre ces deux systèmes sont donc particulièrement diverses et leur étude requiert d'adopter des

---

<sup>28</sup> « La relation complexe entre l'environnement et la société a été abordée depuis de multiples perspectives, cependant, les plus importantes et les plus productives ont été celles qui proviennent des traditions systémiques ».

approches diverses. Dans le cadre de la pénurie en eau, l'approche systémique conduit à associer en particulier des analyses concernant :

- ✓ l'hydrosystème qui repose sur les cycles (physique et chimique) de l'eau ;
- ✓ l'écosystème qui désigne présentement les équilibres et déséquilibres environnementaux (hors cycle de l'eau) ;
- ✓ et le sociosystème qui fait référence aux unités et aux interactions socio-économiques (qui déterminent les infrastructures matérielles, les capitaux et les capacités) mais aussi au contexte institutionnel.

Les défis méthodologiques pour analyser le socioécosystème sont nombreux puisqu'il s'agit de croiser des objets d'études et des disciplines variées (Section 1.1.2). Et encore faut-il leur ajouter des enjeux d'aide à la prise de décision (Section 1.1.3), car les diagnostics définissent des champs et des modalités d'action dans le cadre du sujet d'actualité qu'est la réduction des pénuries en eau.

- Réduire les pénuries en eau : mobilisation internationale pour la gestion de l'eau

« Le sentiment est très répandu que l'eau devient rare par l'effet de tendances qui sont dans une certaine mesure inévitables, en particulier la croissance démographique et l'augmentation de la demande en eau qui en résulte pour satisfaire la production alimentaire et les besoins domestiques, industriels et municipaux » (FAO, 2012). Cette affirmation insiste sur l'actualité des problèmes de pénurie en eau, mais elle insinue aussi qu'elle peut s'intensifier ou au contraire être contenue par des stratégies de gestion et d'usages de l'eau. D'ailleurs de nombreux auteurs insistent sur le fait qu'une grande partie des pénuries sont dus à des infrastructures et des stratégies de gestion inadaptées (Buchs, 2012 ; FAO, 2012 ; Fenwick, 2010). Face à ce constat, la communauté internationale se mobilise pour rationaliser la gestion et les usages de l'eau (UNSG, 2016).

Le sixième *Sustainable Development Goal*<sup>29</sup> (SDG) concerne l'accès à l'eau propre et à l'assainissement (United Nations, 2017). Il est établi en considération du fait que pour protéger la santé des populations, l'eau doit être conduite jusqu'au foyer en répondant à des critères de quantité et de

---

<sup>29</sup> « Objectif de développement durable »

qualité. Les fonds et les actions mobilisées dans ce cadre ont donc vocation à connecter les foyers à des réseaux d'eau satisfaisant aux exigences quantitatives et qualitatives d'hygiène et de consommation, ou à défaut, à réduire le temps de collecte et garantir tant que possible la qualité de l'eau. En complément de cela, des fonds et des actions sont aussi destinées aux problèmes d'assainissement, qui constituent aussi un facteur sanitaire de première importance.

En ce qui concerne les usages économiques, les efforts se concentrent surtout vers le secteur agricole puisqu'il s'agit, rappelons-le, du secteur le plus consommateur d'eau. Durant le XX<sup>ème</sup> siècle une partie conséquente des stratégies de gestion de l'eau en milieu agricole reposait sur le développement de l'irrigation (Blanchon, 2013 ; Lacoste, 2010). Dans ce contexte, le développement de certaines techniques d'irrigation permet de limiter les pertes d'eau occasionnées (Rijsberman, et al., 2006). Mais ces stratégies rencontrent certaines limites qui poussent aujourd'hui les organismes internationaux à insister sur « l'agriculture durable », et non pas sur l'agriculture irriguée (UNSG, 2016). Celle-ci comme son nom l'indique comprend des dimensions hydrologiques mais aussi économiques et sociales (qui sont détaillées dans la Section 2.5.1).

Enfin, en ce qui concerne les enjeux environnementaux de l'eau les stratégies d'action concernent la conservation des masses d'eau ainsi que la réduction des contaminations anthropiques de la ressource (FAO, 2012 ; United Nations, 2017). En l'occurrence, des cadres de gestion intégrée des ressources en eau sont mis en place : l'objectif étant que des stratégies de gestion soient établis à l'échelle des unités hydrographiques (bassins, bassins versants et, moins couramment, aquifères) afin d'atteindre une cohérence hydrologique supérieure à celle qui naît aux échelles institutionnelles et administratives traditionnelles (GWP, 2000). Les contaminations anthropiques sont pour leur part limitées en développant les infrastructures de traitement des eaux résiduelles, et en adoptant des *accords internationaux*<sup>30</sup> qui ont pour objectif de rationaliser les contaminations de types agricoles (United Nations, 2017).

En somme les mesures adoptées contre la pénurie en eau sont élaborées en développant des infrastructures matérielles (de conduction et de traitement de l'eau) mais aussi des transformations de

---

<sup>30</sup> « Les UN font référence aux Conventions de Rotterdam et de Stockholm » (United Nations, 2017).

nature immatérielle (dans le cas de la gestion intégrée, de l'agriculture durable ou de la gestion des pesticides). Les stratégies immatérielles font écho à la dimension socio-économique de la pénurie et, par extension, à sa relation avec la pauvreté.

- Développement, pénuries en eau et pauvreté

La pauvreté, comprise comme un manque de capacité et de capitaux multidimensionnels, est considérée comme une cause de pénurie en eau depuis les travaux de Seckler et al. (1998) et de Ohlsson et Turton (1999). De fait, cette question est au centre de nombreuses préoccupations traitées aux niveaux internationaux. Ainsi l'élimination de la pauvreté constitue l'objectif numéro un des SDG tandis que l'objectif quatre s'intéresse au développement de l'éducation qui est considérée comme un promoteur de capital humain (UNSG, 2016). Et il faut encore ajouter à cela que l'objectif 16 porte sur la paix, la justice et la force des institutions et travaille donc sur les capacités dites institutionnelles.

Or, le développement s'inscrit de manière inégale sur le territoire : des pôles socio-économiques concentrent les infrastructures tandis que certains espaces restent plus en marge de ces dynamiques. En particulier, les villes concentrent les populations et les bâtis, ainsi qu'une grande partie des activités secondaires et tertiaires : ces territoires s'érigent (bien que non uniformément) en pôles de développement, et présentent par définition une forte de réseaux et de structures matérielles et sociales. Au contraire, le monde dit rural, se caractérise conjointement par de faibles densités de populations et/ou par de faibles concentrations du bâti (Flores et Glez, 2015 ; Villalvazo et al., 2002). Néanmoins l'homme impacte le monde rural sous d'autres formes qui incluent notamment les pratiques agricoles et par conséquent les infrastructures associées au secteur primaire. Suite à des contraintes techniques, économiques mais aussi culturelles et géopolitiques, à l'échelle mondiale, l'accès du monde rural aux infrastructures modernes de biens et de services est plus lent et plus difficile que celui des centres de développement que sont les milieux urbains (United Nations, 2017). En outre, « l'agriculture est à la fois cause et victime de la pénurie d'eau. C'est dans la périphérie des grands centres urbains que la concurrence pour l'eau entre les secteurs est la plus évidente, mais elle peut apparaître dans tous les bassins de captage où l'intensification de l'agriculture dans les zones en amont des cours d'eau réduit l'approvisionnement en eau en aval » (FAO, 2012). En somme, les milieux ruraux concentrent des enjeux écosystémiques et sociosystémiques qui leur confère un statut particulier dans le cadre des

pénuries en eau. Dans ce contexte, la FAO (2012) attire l'attention sur les stratégies d'action pour faire face à la pénurie en eau en milieux agricoles tandis que plusieurs études s'intéressent aux pénuries en eau en milieux rural (Fenwick, 2010 ; Sullivan et al., 2003).

Dans la lutte contre les pénuries en eau, les milieux ruraux semblent donc singulièrement exposés. Mais d'autres facteurs interviennent dans la création des vulnérabilités face aux déséquilibres socio-écosystémiques. La vulnérabilité d'une société dépend « de l'action dans le temps et l'espace d'une conjonction de situations (parmi lesquelles les inégalités territoriales dans l'exposition à une source de danger) et de mécanismes propres au système social : exclusion sociale, représentations sociales et politisation du risque, jeux politiques, choix économiques, degré de contrôle de l'application des réglementations, défaillances organisationnelles, etc. » (Becerra et Peltier, 2009).

Urquiza et al. (2015) se penchent explicitement et systématiquement sur les vulnérabilités associées aux pénuries en eau, tandis que d'autres auteurs se concentrent sur quelques aspects isolés des problématiques de pénuries en eau (Avila, 2002 ; Magaña et al., 2012 ; Sturma, 2013). Pour aider les prises de décisions en contexte de pénuries, il est intéressant d'identifier les territoires les plus vulnérables dans une approche multidimensionnelle.

### 1.1.2 Définitions et études de vulnérabilité appliquée aux problématiques socio-environnementales : vers quels outils de diagnostics ?

Les études portant sur la vulnérabilité sont caractérisées par une variété remarquable : « *En los últimos años se han encontrado, aunque con distintos grados de sistematización teórica, trabajos sobre vulnerabilidad social, psicosocial, jurídica, política, cultural, demográfica, entre otros*<sup>31</sup> » (Busso, 2001). Mais étant donné son impact sur les sociétés, l'analyse de la vulnérabilité associée aux déséquilibres socio-écosystémiques s'est établie comme une thématique de toute première importance. Dans ce cadre, la vulnérabilité dépend de systèmes complexes (Section 1.1.1), et s'établit comme un

---

<sup>31</sup> « Dans les dernières années on a trouvé, bien qu'avec différents degrés de systématisation théorique, des travaux sur la vulnérabilité sociale, psychologique, juridique, politique, culturelle, et démographique, entre autres. »

objet d'étude multidimensionnel : « pluriel et multiscalaire » (Becerra, 2012). Les réflexions sur cet objet d'étude complexe transcendent donc les frontières disciplinaires, et suscitent donc des interrogations épistémologiques associées au défi de l'interdisciplinarité.

- Difficultés de définition des vulnérabilités socio-environnementales

Les définitions adoptées pour l'étude de la vulnérabilité sont caractérisées par une grande diversité terminologique comme l'indique le Tableau 1. Pour certains il s'agit d'une probabilité, pour d'autres c'est un processus, pour d'autres encore c'est une propension ou encore une condition, une faiblesse, une capacité insuffisante voire une susceptibilité. Il faut dire que les études de vulnérabilité se sont développées dans un contexte qui rend le travail de définition particulièrement délicat. En plus de la diversité des approches (mentionnée en introduction de cette sous-partie) et des problèmes associés aux traductions de termes anglais comme *hazard* (en français danger, risque ou aléa, et en espagnol à peu près *peligro*, *riesgo* o *azar*), un autre obstacle provient du fait que les études sur la vulnérabilité des sociétés se sont développées en parallèle et en complément des études de risques (Becerra, 2012 ; Birkmann, 2007 ; Darío Cardona, 2001).

| Références                       | Définitions (traduites)   |
|----------------------------------|---|
| Busso (2001)                     | « processus multidimensionnel qui aboutit au risque ou à la probabilité d'un individu, d'un foyer, ou d'une communauté à être blessé, lésé ou abîmé devant des changements ou des permanences de situations externes ou internes. » |
| Darío Cardona (2001)             | « condition circonstance ou prédisposition, résultat d'une susceptibilité, de fragilités et d'un manque de capacité à la récupération [face à un évènement] »   |
| GTZ (2003)<br>Adger (2006)       | « susceptibilité [d'un système] à subir des dommages »  |
| Rousseau (2003)<br>Lallau (2008) | « probabilité de voir sa situation ou ses conditions de vie se dégrader, quelque soit son niveau de richesse, face aux fluctuations de la vie »   |
| Bogardi (2004)                   | « une faiblesse cachée, qui reste sans doute imperceptible pendant longtemps, mais peut se révéler de façon perverse lorsqu'une communauté vulnérable est exposée à un danger »   |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Reghezza (2006)        | « propension à subir des dommages »   |
| Birkmann (2007)        | « conditions déterminées par des facteurs ou des processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la susceptibilité d'une communauté à l'impact d'un danger »   |
| Sturma (2013)          | « capacité insuffisante à faire face à un danger ou à une série de menaces en chaîne »  |
| Birkmann et al. (2013) | « propension d'éléments exposés comme des biens physiques ou des capitaux, ou bien des êtres humains et leurs moyens de subsistances, d'être blessé ou de subir des dommages et des pertes au moment où ils seraient impactés par un évènement dangereux isolé ou composé » |

**Tableau 1 : Différentes définitions de la vulnérabilité**

Bogardi (2004) constatait ainsi que « *while there is a fair consensus regarding the terms “hazard” (the occurrence of an extreme event with an estimated (low) frequency) and “risk” (associating the occurrence probability of the extreme event (hazard) with the (economic and financial) losses it would imply (Kron, 2003 ; Plate, 2002)), there is much uncertainty about what the term “vulnerability” covers<sup>32</sup>* ». Les incertitudes mentionnées par l'auteur peuvent partiellement s'expliquer par le positionnement difficile des études de vulnérabilité par rapport à celles qui concerne les risques :

- ✓ Bogardi (2004) et Birkmann (2007) définissent la vulnérabilité en employant le mot *hazard* ;
- ✓ Sturma (2013) pour sa part fait référence au danger, mais en lui ajoutant aussi une expression « menace en chaîne » qui semble rompre avec la définition donnée par Bogardi (2004) ;
- ✓ Busso (2001) emploie quant à lui le mot risque et le double du terme probabilité comme pour renforcer la référence à la définition du risque ;
- ✓ en parallèle, Rousseau (2003) emploie seulement le terme probabilité et semble vouloir séparer la définition de la vulnérabilité de celles du risque et du danger ;
- ✓ mais d'autres auteurs n'emploient aucun terme commun avec les définitions de risque ou de danger (Adger, 2006 ; GTZ, 2003 ; Reghezza, 2006).

<sup>32</sup> « Alors qu'il y a un large consensus en ce qui concerne les termes 'danger' (la survenue d'un évènement extrême avec une (faible) fréquence estimée) et 'risque' (associant la probabilité de survenue d'un évènement extrême (danger) avec les pertes (économiques et financières) qu'il implique (Kron, 2003 ; Plate, 2002), il existe une grande incertitude à propos de ce que recouvre le terme 'vulnérabilité' ».



Dans ce cadre, le consensus récemment atteint par Birkmann et al. (2013) est tout à fait notable puisque la définition proposée évite les redondances avec les définitions de risque et de *hazard*, et qu'il synthétise de manière assez fidèle toutes les définitions précédentes. Elle est d'ailleurs issue d'un travail intrinsèquement interdisciplinaire.

- Une perspective interdisciplinaire pour approcher la vulnérabilité ?

L'interdisciplinarité est définie comme « une articulation de savoirs, qui entraîne, par approches successives, comme dans un dialogue, des réorganisations partielles des champs théoriques en présence » (Béchillon, 1997 *in* Louvel, 2015). Dans les milieux scientifiques elle consiste en des échanges conceptuels entre les disciplines et prend souvent la forme d'équipe interdisciplinaire, que l'OCDE définit comme un groupe « de personnes qui ont une formation dans différentes connaissances (disciplines) ayant chacun des concepts, des méthodes données et des termes propres » (OCDE, 1972, *in* Colet et Mary, 1993). Cette démarche qui n'est pas récente, soulève pourtant dans l'actualité de nombreuses questions au sein de la communauté scientifique, particulièrement en ce qui concerne les sciences de l'éducation et les recherches sur le socioécosystème. La démarche est compliquée puisqu'elle exige d'ébranler les acquis disciplinaires (Becerra, 2012). En outre, il faut signaler que l'intérêt croissant pour les approches interdisciplinaires sort la plupart du temps du domaine strictement académique. Prud'homme et Gingras (2015) mettent en évidence l'importance d'enjeux associés à :

- ✓ la « sous-traitance » ;
- ✓ la « demande académique de l'établissement » ;
- ✓ et l' « accès à la décision publique ».

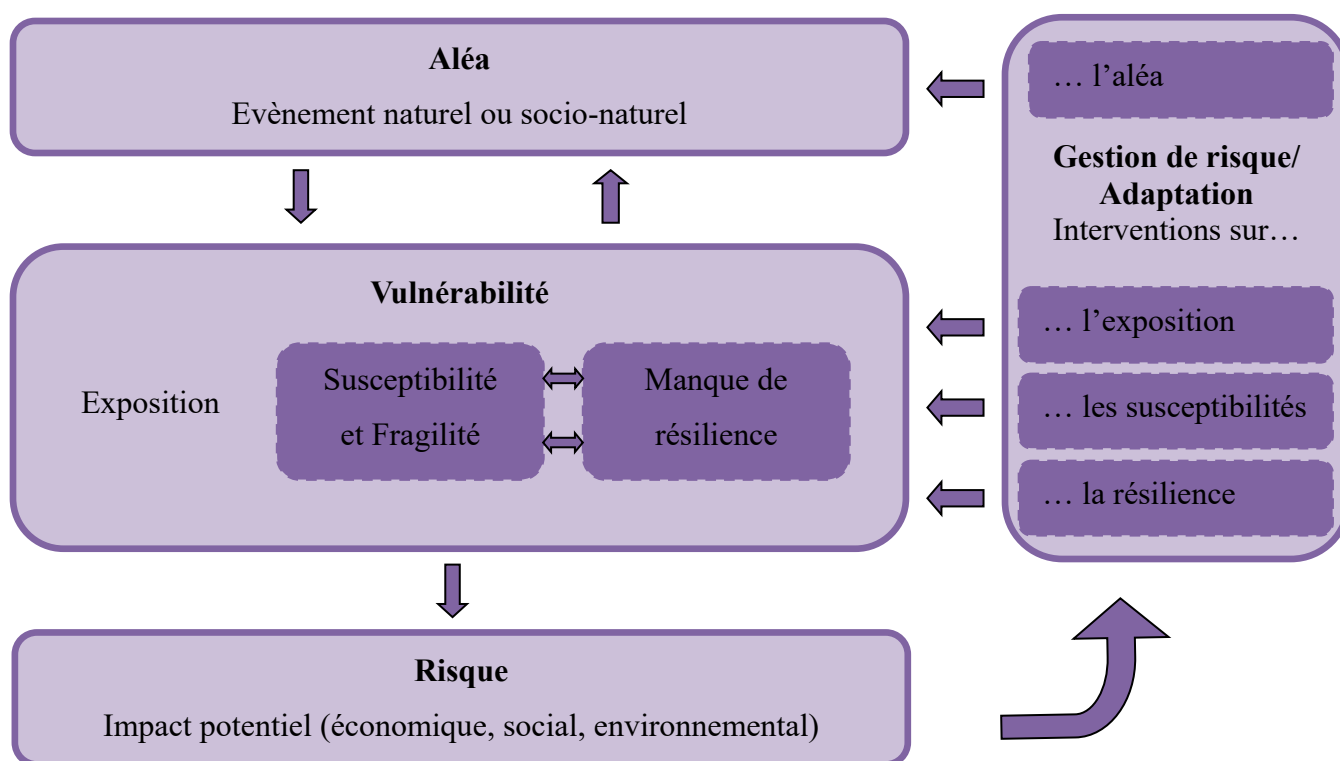
Face à ce constat, les réticences et les hésitations sont fortes notamment en ce qui concerne la sociologie de l'environnement (Audet, 2008).

Malgré les interrogations et les difficultés associées à de telles entreprises, des chercheurs en provenance de différentes disciplines se sont regroupés afin d'élaborer un cadre analytique commun sur la vulnérabilité. Il s'agissait d'évaluer la vulnérabilité dans la perspective d'aider les prises de décision et en particulier le *Disaster Risk Management*<sup>33</sup> et la *Climate Change Adaptation*<sup>34</sup> (Birkmann et al., 2013).

---

<sup>33</sup> « Gestion des risques associés aux catastrophes ».

Les résultats de ces travaux, appelés *Method for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe*<sup>35</sup> (MOVE), sont synthétisés dans la Figure 1.



**Figure 1 : Approche MOVE des vulnérabilités et de la gestion des risques**  
(inspirée de Birkmann et al. (2013))

MOVE n'est pas le premier travail interdisciplinaire sur la vulnérabilité. Au contraire, la révision bibliographique menée par Becerra (2012) atteste notamment que l'aspiration et les essais de cette nature étaient nombreux et débouchaient sur une multitude de propositions (Adger, 2006 ; Becerra, 2012 ; Reghezza, 2006 ; Shirley, et al., 2003 ; Turner et al., 2003). Deux tendances se distinguaient dans les définitions de vulnérabilité. Certaines études déterminaient deux dimensions thématiques, appelés des facteurs clés dans la perspective MOVE. Le premier était « biophysique » ou « extrinsèque » selon les auteurs, et pourrait correspondre à ce qui est signalé comme « exposition » dans la perspective MOVE

<sup>34</sup> « Adaptation au changement climatique »

<sup>35</sup> « Méthode pour l'amélioration des évaluations de vulnérabilité en Europe »

(Becerra, 2012 ; Reghezza, 2006 ; Shirley et al., 2003). Par opposition le second était social, ou intrinsèque. Dans la perspective MOVE, cet ensemble thématique est mis en évidence par les deux encadrés « manque de résilience » et « susceptibilité et fragilités » dont les interactions sont mises en exergue par des flèches : ces éléments délimitent visiblement un ensemble qui se distingue de l'exposition. En parallèle, d'autres auteurs définissaient trois facteurs clés de vulnérabilité. Dans ce cadre l'exposition, parfois appelée « fragilité physique » se retrouvait de manière relativement constante dans ces définitions. Les deux autres facteurs clés, regroupant là aussi des facteurs sociaux et sociétaux, mobilisaient pour leur part un vocabulaire divers (Becerra, 2012 ; Sturma, 2013). Certains auteurs faisaient référence à la « vulnérabilité initiale », ou encore à des « fragilités socio-économiques » ou des « susceptibilités » qui trouvent écho dans MOVE. Enfin, le dernier facteur clé de la vulnérabilité parfois appelé « vulnérabilité secondaire » faisait plutôt référence à des processus (contrairement aux deux autres qui étaient plutôt des états). Il pouvait être tour à tour défini en fonction de la « résilience », de l'« adaptation », de diverses « capacités de réponse », ou de plusieurs de ces concepts. A ce sujet, il est notable que MOVE emploie les trois concepts mais à des niveaux différents. Dans ce cadre, la résilience est définie comme la faculté « *to deal with a disturbance*<sup>36</sup> », et dépend de trois niveaux de capacités : « *capacity to anticipate*<sup>37</sup> », « *capacity to cope*<sup>38</sup> » et « *capacity to recover*<sup>39</sup> » (Birkmann et al., 2013). En outre, la gestion de risque est définie en fonction de l'adaptation et déclinée en actions intervenant sur les facteurs clés de vulnérabilité ainsi que sur les aléas : « *while coping capacities and resilience are primarily linked to capacities that help to maintain the current status of the systems under stress, adaptation as a concept implies actions aimed at making more profound change in socio-ecological relations*<sup>40</sup> » (Birkmann et al., 2013). Autrement dit, la notion de résilience fait avant tout référence à la gestion de la crise (entendue comme le moment où l'aléa survient), tandis que celle d'adaptation porte sur des processus de transformation plus longs.

---

<sup>36</sup> « négocier une perturbation »

<sup>37</sup> « capacité d'anticipation »

<sup>38</sup> « capacité à faire face »

<sup>39</sup> « capacité de récupération »

<sup>40</sup> « alors que la capacité à faire face et la résilience sont principalement associés aux capacités permettant de maintenir le statut du système au moment où il est soumis au stress [de l'aléa], l'adaptation en tant que concept implique des actions qui ont pour objectif de générer des changements plus profonds dans les relations socio-écologiques ».

MOVE permet de clarifier la définition ainsi que de fixer les facteurs clés pour l'étude de la vulnérabilité. A ce titre, il constitue une opportunité pour uniformiser le lexique et déterminer les entrées analytiques. Cependant, cet avantage va de pair avec une difficulté plus ou moins transitoire : il suppose de transformer les systèmes de référence antérieurs, et implique certains sacrifices. En particulier MOVE sépare l'aléa et la vulnérabilité, mais l'exposition est techniquement déterminée par l'aléa (dépendant tant de son extension spatiale que de son intensité). En outre, le terme de « sensibilité » employé dans de nombreuses approches cartographiques de la vulnérabilité a été écarté (Leone et Vinet, 2006b). Ce terme attire traditionnellement l'attention sur l'adéquation des infrastructures physiques ainsi que l'importance des pôles qui garantissent dans une certaine mesure le fonctionnement du sociosystème sur le territoire. Dans MOVE, cet aspect est situé à l'interface de l'exposition et de la fragilité. C'est d'ailleurs ce que laissait entendre Becerra (2012), en signalant :

*« la fragilité des individus, groupes ou communautés considérés tout comme leur capacité de réponse tant à l'imprévu (crise) qu'aux difficultés quotidiennes (ordinaires) :*

- ✓ *Une organisation socio-spatiale (vulnérabilité territoriale ; exposition à certains risques dus à l'implantation spatiale, mais aussi à des processus de ségrégation ou d'exclusion sociale) ;*
- ✓ *Des « manières d'être disposé » (représentations du risque ; valeurs et visions du monde ; attitudes ; comportements) qui peuvent être étudiés à l'échelle individuelle ou collective ;*
- ✓ *Des modes de régulations à l'échelle individuelle comme collective pour régler le problème : des décisions, des ressources, des dispositifs socio-techniques ou institutionnels, des mesures d'action dont la mise en œuvre ou l'usage qui n'ont de sens que replacés dans les autres formes de régulations inhérentes à la vie quotidienne ordinaire de la communauté. Le contexte politique des décisions ou les normes sociales du lieu où elles prennent corps sont des aspects particulièrement importants ».*

Dans ce texte l'organisation socio-spatiale fait traditionnellement écho à des paramètres de sensibilité, mais aussi à des paramètres de l'ordre de la pauvreté, comprise de manière multidimensionnelle (Section 1.1.1). Au niveau analytique, comment séparer alors ces deux aspects du problème ? Ces questions associées à la délimitation de l'aléa, de l'exposition et des fragilités (physiques et socio-économiques) s'étendent aussi aux dimensions sociales de la vulnérabilité. Birkmann et al. (2013) font référence à des susceptibilités physiques, culturelles, économiques, sociales et institutionnelles d'une part, et à des

capacités de résilience et d'adaptation d'autre part. Mais les réalités qui sont derrière ces concepts sont à la fois diverses et liées : les « manières d'être disposés » et les « modes de régulation » de Becerra (2012) font référence à des systèmes de pensées et des processus de négociations qui impactent tout à la fois la résilience et l'adaptation.

Ces limites expliquent peut-être le fait que MOVE ne se revendique pas interdisciplinaire (mais holistique) et que : « *As a heuristic, the MOVE framework is a thinking tool [but it] does not provide a specific assessment method (qualitative or quantitative) or a predefined list of indicators*<sup>41</sup> » (Birkmann et al., 2013). Les interrogations méthodologiques concernant l'analyse et le diagnostic de vulnérabilité interdisciplinaire restent donc entières à ce jour.

- Hétérogénéité et tendances des méthodologies adoptées pour étudier la vulnérabilité associée aux aléas socio-naturels

« Cercle vicieux de vulnérabilité, les interactions et coévolutions sociétés-environnement contraignent finalement les scientifiques à sortir de leur cadre disciplinaire pour envisager de nouveaux cadres conceptuels. Peu de travaux scientifiques proposent cependant une analyse couplée de la vulnérabilité des systèmes sociaux et des systèmes environnementaux [et] il n'y a pas de consensus méthodologique sur la manière d'évaluer la vulnérabilité que ce soit sur la collecte de données comme à propos de leur agrégation dans un index synthétique » (Becerra, 2012). Néanmoins, parmi la grande diversité des méthodes d'étude de la vulnérabilité trois grandes tendances apparaissent.

Des approches qualitatives sont adoptées pour étudier les vulnérabilités dites sociales (Becerra, 2012 ; D'Ercole, et al., 1998 ; Lavie, et al., 2016 ; Leone et Vinet, 2006a ; Lutloff, et al., 2007). Elles s'intéressent aux représentations, aux pratiques, aux structures sociales et politiques, et aux négociations en rapport avec la gestion territoriale. La diversité des démarches analytiques qualitatives fait écho à la diversité des objets et des échelles d'études, car « *la vulnerabilidad social de sujetos y colectivos de población se expresa de varias formas, ya sea como fragilidad e indefensión ante cambios originados en*

---

<sup>41</sup> « En tant qu'heuristique la structure MOVE est un outil de réflexion [mais elle] ne produit pas de méthode d'évaluation spécifique (qualitative ou quantitative) ni de liste prédéfinie d'indicateurs. »

*el entorno, como desamparo institucional desde el Estado que no contribuye a fortalecer ni cuida sistemáticamente de sus ciudadanos ; como debilidad interna para afrontar concretamente los cambios necesarios del individuo u hogar para aprovechar el conjunto de oportunidades que se le presenta ; como inseguridad permanente que paraliza, incapacita y desmotiva la posibilidad de pensar estrategias y actuar a futuro para lograr mejores niveles de bienestar<sup>42</sup> » (Busso, 2001). Malgré l'hétérogénéité qui les caractérise et les interrogations qu'elles soulèvent du point de vue de l'aide à la prise de décision (Section 1.1.3), ces approches spécifiques tiennent une place notable dans les études de vulnérabilité, au point que Birkmann et al. (2013) les mentionnent parallèlement à la méthodologie quantitative qu'ils emploient eux-mêmes.*

En parallèle, il faut dire que la cartographie permet d'intégrer la dimension spatiale des phénomènes observés dans les analyses (Flaus, et al., 2010 ; Maestriperieri, 2012). Elle comprend d'ailleurs des alternatives méthodologiques intéressantes pour opérer des diagnostics environnementaux mais aussi pour les croiser avec des analyses d'ordre socio-économiques (Section 1.4.2). C'est pourquoi les approches cartographiques, notamment grâce à leurs atouts multidimensionnels et multi-scalaires, se sont imposées dans les diagnostics de risques et de vulnérabilité (Leone et Vinet, 2006b ; Prével et al., 2003). Celles-ci, intimement liées aux études de l'aléa, centrent traditionnellement l'analyse de vulnérabilité sur l'exposition en incluant aussi la sensibilité et des analyses relatives à l'organisation et la structure territoriale.

Récemment une dernière tendance semble prendre aussi de l'ampleur : plusieurs auteurs ont ainsi signalé l'intérêt des indices pour la construction de diagnostics de vulnérabilité multidimensionnels (Becerra, 2012 ; Benoît, 2008). Ces outils sont construits à partir de certaines méthodes (présentées dans la Section 1.1.3) qui sont aussi employées en cartographie (même si des différences sont à noter 1.4.2). Ils sont notamment pressentis pour étudier conjointement l'exposition, les fragilités (définies principalement comme pauvreté) voire même la résilience. De fait, Birkmann et al. (2013) utilisent des

---

<sup>42</sup> « La vulnérabilité sociale des sujets et des collectifs de populations [...] s'exprime sous plusieurs formes, soit comme une fragilité et manque de recours face aux changements fondés dans leur environnement, comme une impuissance institutionnel depuis l'Etat qui ne contribue pas à renforcer ou à protéger systématiquement ses citoyens, comme une faiblesse interne pour affronter concrètement les changements nécessaires de l'individu et du foyer pour rendre profitable l'ensemble des opportunités qui se présentent à eux, comme une insécurité permanente qui paralyse, handicape et démotive la possibilité de concevoir des stratégies et d'agir à long terme pour atteindre de meilleurs niveaux de bien-être. »

indices pour appliquer MOVE dans le cadre de risques d'inondations et de tremblements de terre : ils vont jusqu'à intégrer dans leur étude des facteurs liés à l'adaptation et aux aléas.

La vulnérabilité est donc étudiée à travers des analyses à la fois qualitatives et quantitatives. Ces deux méthodes semblent relativement complémentaires : tandis que les premières s'intéressent surtout aux capacités et à l'adaptation, les secondes s'intéressent surtout à l'exposition, les points de rencontres ou de redondance étant essentiellement l'analyse des fragilités. Mais aujourd'hui, les indices semblent voués à révolutionner la méthodologie de diagnostics de vulnérabilités. Leur complémentarité avec les approches cartographiques est aisée à comprendre (étant donné les similitudes méthodologiques qu'elles présentent). Mais l'affirmation de Lallau (2008) laisse entendre que l'utilité des indices pourraient aller plus loin et permettre de standardiser l'étude de la vulnérabilité qui « prend [...] un caractère multidimensionnel, dont pourront rendre compte différentes approches statistiques, telles que les analyses multivariées et les méthodes de l'économétrie qualitative [...], ou encore la construction d'indices composites ». Néanmoins pour le moment, les avancées restent relativement limitées : même Birkmann et al. (2013) utilisent deux listes d'indicateurs différentes pour appliquer MOVE dans le cadre de vulnérabilité aux inondations et aux tremblements de terre. Ce faisant, ils définissent deux indices distincts et continuent d'interroger les alternatives méthodologiques de diagnostic de la vulnérabilité associé aux évènements socio-naturels.

### 1.1.3 *Diagnostiquer la vulnérabilité liée aux pénuries en eau à travers le calcul et la discussion de l'IPE : les ressorts d'une approche interdisciplinaire*

La section précédente donne à voir que les diagnostics de vulnérabilités posent de nombreuses questions épistémologiques associés à l'interdisciplinarité. Dans ce contexte, la perspective MOVE laisse supposer que les méthodes d'analyse de la vulnérabilité varient selon l'aléa considéré tout, en attirant l'attention sur des outils de diagnostics quantitatifs qui semblent répondre en outre aux objectifs d'aide à la prise de décision. A ce sujet, il est notable que plusieurs diagnostics de vulnérabilité et des indices de pénuries en eau précèdent cette étude : certains d'entre eux ont d'ailleurs employé des indices pour traiter la question des vulnérabilités aux pénuries en eau.

- Diagnostics de vulnérabilité et pénuries en eau

Les variations dans la répartition et la composition de l'eau affectent les sociétés de telle sorte que plusieurs études se sont intéressées aux vulnérabilités liées à l'eau. Néanmoins, il faut noter que les études de vulnérabilité s'intéressent plus encore à l'excès qu'au manque d'eau, qui constitue de fait un aléa singulier.

L'étude de la vulnérabilité portant sur les inondations (Birkmann et al., 2013 ; Daupras, 2015 ; Leone, 2007 ; Reghezza, 2006) se distingue de celle portant sur les pénuries en eau (Avila, 2003 ; Eakin, 2003 ; Magaña, et al., 2012). Le fait est que les aléas considérés ne sont pas de même nature : ils impliquent des temporalités et des expressions spatiales différentes. En effet les inondations sont provoquées par des événements spatialement et temporellement bien délimités, de telle sorte qu'elles sont d'ailleurs caractérisées par l'évidence et l'urgence de la catastrophe naturelle. Elles provoquent en l'occurrence des dommages physiques (pertes matérielles et humaines) qui ont eux-mêmes des impacts plus ou moins forts sur les fonctionnements socio-économiques de la société. Au contraire, les pénuries en eau ont une nature multidimensionnelle qui s'exprime de manière différemment sur le territoire (Section 1.1.1). Les affectations physiques sont variées et interactives (la baisse des niveaux piézométriques impacte par exemple plus ou moins visiblement l'aridité des écosystèmes), ce qui rend leurs délimitations difficiles. Certains événements de pénuries en eau prennent des formes urgentes : c'est le cas des crises sanitaires dues à des dégradations hydriques qualitatives (comme la crise de choléra qu'a connu le Mexique dans les années 1990), ou bien des épisodes de sécheresse prolongée (comme celle qui a aussi atteint le Mexique durant la première décennie du XX<sup>ème</sup> siècle). Mais même dans ces cas, la temporalité et la diffusion des affectations physiques restent différentes de celles associées aux inondations. En outre, les pénuries en eau comprennent aussi des dimensions socio-économiques : aux impacts socio-économiques dus aux affectations physiques viennent donc s'ajouter des dommages qui sont directement de nature immatérielle. Les répercussions de ces aléas socio-naturels (d'après la terminologie MOVE, section 1.1.2) sont donc elles aussi variées et interactives.

Les études de vulnérabilité associée aux inondations aux pénuries en eau sont donc différentes. En l'occurrence, pour les inondations l'attention porte sur l'exposition et les fragilités d'une part et d'autre



part sur la résilience, et en particulier la capacité à faire face : celle-ci mobilise d'ailleurs autant les études quantitatives ou qualitatives (Birkmann et al., 2013 ; Daupras, 2015). Au contraire, l'étude des vulnérabilités associées aux pénuries en eau se penche peu sur la résilience et la capacité à faire face : elles s'intéressent plutôt à l'exposition, et aux fragilités (Arreguin Cortés, Lopez et al., 2015; Avila, 2002 ; Magaña et al., 2012) mais aussi aux processus d'adaptation du sociosystème (Blot et al., 2015; Eakin, 2003 ; Sturma, 2013 ; Urquiza et Cadenas, 2015). Pour cela, les outils de diagnostics restent les mêmes que ceux mentionnés dans la section 1.1.2 : des approches qualitatives se centrent sur les vulnérabilités dites sociales, tandis que l'exposition et une partie des fragilités (liées à la pauvreté) sont appréhendées de manière quantitative. De fait, les études quantitatives emploient des indices, plus ou moins associés à des analyses cartographiques<sup>43</sup> : à ce stade, il convient donc de prêter attention aux procédés de création et d'association d'indicateurs qui apparaissent si prometteurs pour l'approche multidimensionnelle de la vulnérabilité associée notamment aux pénuries en eau.

- Construction d'indice et aide à la prise de décision

*« In general terms, an indicator is a quantitative or a qualitative measure derived from a series of observed facts that can reveal relative positions [...] in a given area <sup>44</sup> »* (OECD et JRC, 2008). Cette définition suppose une posture intrinsèquement comparative. En outre, l'élaboration d'indicateur repose sur l'observation préalable d'une ou plusieurs séries de faits, qui sont a priori liés les uns aux autres. Cela fait écho aux approches systémiques (définies dans la Section 1.1.1) : tandis que les approches systémiques s'intéressent aux interactions et aux rétroactions entre les éléments d'un système, les indicateurs s'intéressent à la corrélation de leurs comportements. Vollmer, et al. (2016) insistent sur la spécificité de cette approche épistémologique à travers l'expression « focales analytiques » : *« we use the term 'analytical lens' here to denote the conceptual foundation on which indicator selection is*

---

<sup>43</sup> La cartographie est employée soit pour donner une représentation finale à des indices statistiques, soit pour élaborer des analyses spécifiquement cartographiques (modélisations), avec des outils et des indicateurs spécifiques (certains d'entre eux sont présentés dans la Section 1.4.2).

<sup>44</sup> « De manière générale, un indicateur est une mesure quantitative ou qualitative provenant d'une série de faits observés qui peuvent révéler des positions relatives [...] dans un domaine donné. »

*based*<sup>45</sup> ». De fait, la construction d'indicateur implique de sacrifier l'exhaustivité au profit de la représentativité. Les auteurs signalent que plusieurs focales peuvent dès lors servir à observer une même série de faits.

Dans ce contexte, lorsqu'un indicateur ne suffit pas à rendre compte d'une position relative particulière, plusieurs indicateurs sont associés pour former un indice. C'est le cas pour l'étude de systèmes complexes (définis dans la Section 1.1.1), pour lesquels il faut recourir à des indicateurs en provenance de différents domaines (économiques, sociaux, écologiques, etc.). Les indices impliquent donc deux niveaux de définitions épistémologiques et reposent donc sur des focales analytiques et des opérations de comparaisons plus complexes que les indicateurs. Dans ce cadre, les indicateurs tendent à être construits ou traduits de manières quantitatives, afin de pouvoir les croiser entre eux par des méthodes statistiques. Un postulat quantitatif vient donc s'ajouter. L'OECD et JRC (2008) ou Garriga and Foguet (2010a) précisent alors que pour élaborer un indice il faut veiller à :

- ✓ la pertinence des indicateurs, laquelle dépend de la focale analytique mais aussi en plus ou moins grande partie de la disponibilité des données (Sections 1.3.1) ;
- ✓ et la répliquabilité et la transparence des traitements statistiques.

L'analyse dite « multicritère » (AMC) consiste en une série d'opérations statistiques qui répond aux critères de répliquabilité et de transparence (Jiang et Eastman, 2010). Concrètement, l'AMC comprend deux étapes essentielles et complémentaires : la normalisation et l'agrégation (Eastman et al., 1995 ; OECD et JRC, 2008). La première correspond à une interprétation statistique des indicateurs. Elle consiste à déterminer les conditions favorables et défavorables de chaque indicateur. Pour cela il existe diverses alternatives ; plusieurs d'entre elles reposent sur la définition de seuils<sup>46</sup>. Ces seuils servent à construire une échelle de classification pour visualiser dans quelle mesure les données observées s'approchent ou s'éloignent des conditions optimales et minimales. La normalisation s'opère ensuite en comparant les données avec les seuils optimaux et minimaux. Cette phase où les indicateurs sont analysés séparément, échelonne les valeurs correspondantes entre 0 et N, où 0 représente les conditions

---

<sup>45</sup> « Nous utilisons ici le terme 'focales analytiques' pour faire référence aux fondements conceptuels sur lesquels les indicateurs sont sélectionnés »

<sup>46</sup> L'OECD et JRC (2008) recensent plusieurs alternatives de normalisation. Néanmoins dans la présente étude, les deux techniques de normalisation considérées (Sections 1.2.2 et 1.4.2) procèdent par comparaison, et emploient des seuils définis soit à partir de la littérature spécialisée, soit à partir des données elles-mêmes ou d'autres données similaires.

considérées comme minimales, et N les conditions considérées comme optimales (Manandhar, et al. 2012). Les résultats obtenus n'ont plus d'unité, et transcrivent tous les indicateurs sur une même échelle. Sous cette forme, ils peuvent donc être agrégés numériquement : c'est l'objectif de la seconde phase de l'AMC. L'agrégation des indicateurs est définie par une équation de base, offrant ainsi la possibilité d'être appliquée dans différentes études (OECD et JRC, 2008 ; Vollmer et al., 2016). Comme toutes les équations, elle consiste en un traitement statistique qui est caractérisé par différentes variables, différentes pondérations et différentes opérations numériques. Les variables correspondent aux indicateurs normalisés. Les opérations statistiques définissent l'impact de ces variables sur le résultat final, selon qu'il accroît ou réduit le phénomène observé. Enfin, les pondérations servent à nuancer leur impact sur le résultat final, en fonction de leur importance supposée ou observée (Eastman et al., 1993 ; Saaty, 1987 ; Yager, 1988). L'équation de base est le reflet mathématique de la « focale analytique ».

La construction d'indices à partir des AMC donne littéralement un sens aux données (OECD et JRC, 2008 ; Vollmer et al., 2016). Cela suppose tant de choix (construction de la « focale analytique » et de l'équation de base, sélection des indicateurs, des seuils et des opérations pondérations etc.) que de nombreux doutes existent à leur encontre. Les critiques portent notamment sur la simplification de la réalité et l'univocité des résultats qui prennent théoriquement la forme d'un seul chiffre (Molle et Mollinga, 2003). Face à elles, la cohérence et la transparence méthodologiques sont d'autant plus fondamentales ; avec ces restrictions les indices permettent néanmoins de réaliser des diagnostics systématiques et synthétiques. Ces deux atouts sont particulièrement appréciés dans le cadre de l'aide à la prise de décision : « *In the context of policy analysis [...] indicators are useful in identifying trends and drawing attention to particular issues* <sup>47</sup> » (OECD et JRC, 2008). De fait, les indices servent à rationaliser les décisions en identifiant de manière argumentée des aires d'interventions prioritaires. Dans ce cadre, les problématiques de simplification de la réalité et d'univocité des résultats sont d'autant plus importantes mais un autre critère vient encore s'ajouter, et tendrait même à évincer les autres (Lascoumes et Le Galès, 2005). En effet, même si elles n'apportent pas de solution aux limites précédemment mentionnées, les représentations cartographiques sont particulièrement appréciées par les

---

<sup>47</sup> « Dans le cadre politique [...] les indicateurs sont utiles pour identifier des tendances et attirer l'attention sur des problèmes particuliers. »

preneurs de décisions : la clarté apparente de ces supports favorise de fait leur utilisation et leur diffusion en dehors des milieux scientifiques.

Malgré ces limites, les perspectives d'aide à la prise de décision expliquent l'intérêt croissant pour les indices (et pour les cartes) dans les études de vulnérabilité. En outre, elles ont fortement impacté les diagnostics de pénuries en eau.

- Un Indice de Pauvreté en Eau pour étudier les pénuries et la vulnérabilité ?

Depuis les travaux de Falkenmark (1986, 1989), les diagnostics de pénurie en eau sont élaborés dans des approches multidimensionnelles et avec des perspectives d'aide à la prise de décision (Molle et Mollinga, 2003a ; Vollmer et al., 2016). Dans ce cadre, le Centre d'Ecologie et Hydrologie (CEH) a créé en 2002 l'IPE (Sullivan et al., 2002). Dernier outil en date d'étude sur cette thématique, son objectif est de standardiser les diagnostics de pénurie en eau dans le cadre de l'aide aux processus de décision.

S'agissant d'un indice, l'IPE repose sur l'association d'indicateurs, construits de manière quantitative. En accord avec les autres indices des pénuries en eau, il intègre les facteurs qualitatifs et quantitatifs de dégradation de la ressource mais aussi des facteurs socioéconomiques (Molle et Mollinga, 2003b ; Vollmer et al., 2016). Néanmoins, l'IPE va encore plus loin que les autres indices de pénurie en eau dans le cadre de l'aide à la prise de décision. En effet, la méthodologie a été co-construite avec des acteurs non-scientifiques. Sullivan et al. (2002) expliquent que l'IPE n'a pas pour objectif d'élaborer un diagnostic scientifique à proprement parlé, ou bien de créer de surprise. Au contraire, il doit donner à voir, à travers un outil systématique, les diagnostics « locaux ». L'objectif est d'inscrire les débats politiques et sociaux de gestion dans un cadre à la fois compréhensible, et accepté par ses utilisateurs, mais aussi dans un cadre représentatif, autrement dit, en accord avec les représentations des acteurs concernés. L'IPE constitue donc avant tout une proposition de collaboration entre sciences et société. Cette démarche explique le changement de paradigme qui transforme l'étude de 'pénurie' en étude de 'pauvreté' en eau (Section 1.2.1). Malgré la rupture que cela représente, le succès de l'entreprise est confirmé par les nombreuses applications de l'IPE (Cho et al., 2010 ; Fenwick, 2010 ; Garriga et Foguet, 2010 ; Heidecke, 2006). La communauté scientifique s'en est saisie au point que l'IPE a parfois été sorti de son cadre d'origine pour être appliqué dans des études de vulnérabilité.

Sullivan et Meigh (2005), et Castelazo et al. (2007) emploient même l'IPE pour calculer l'Indice de Vulnérabilité Climatique (IVC) respectivement à l'échelle nationale pour l'ensemble des états du globe, et dans la municipalité de Juarez, au Mexique. Pour cela, ils ajoutent une sixième composante à l'IPE : la composante dite géospatiale. D'après Sullivan et Meigh (2005), elle « *represent the specific geographical attributes associated with any location* »<sup>48</sup>. De fait, elle intègre trois types de données associés :

- ✓ à la marginalisation physique des habitants,
- ✓ à la cartographie des risques,
- ✓ aux dynamiques de changements du couvert végétal liées aux pratiques anthropiques et au changement climatique.

La démarche Castelazo et al. (2007) est semblable à la précédente, mais elle ajoute des données liées aux infrastructures de gestion de crise. Autrement dit, cette étude insiste sur des facteurs de gestion de crise, alors que Sullivan et Meigh (2005) ne font qu'esquisser cette perspective. Mais leur démarche permet surtout de développer des indicateurs d'exposition à certains risques climatiques qui n'entraient pas directement dans le cadre des études de la pauvreté en eau, à savoir l'inondation. L'IVC ouvre des pistes de réflexion intéressantes sur la singularisation géo-spatiale des territoires dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité.

En dehors du cadre de l'IVC d'autres applications de l'indice associent d'ailleurs l'IPE avec le concept de vulnérabilité. Au Mexique, Fenwick (2010) affirme que : « *much of the current research similarly focuses on water resources availability emphasizing the vulnerability of communities to physical water scarcity* »<sup>49</sup>. Cette déclaration insiste sur le fait que l'étude des pénuries en eau comme celle des vulnérabilités associent des dimensions sociales en plus des dimensions physiques. Et Manandhar et al. (2012) centrent pour leur part explicitement leur étude sur les problématiques de mitigation des vulnérabilités. Le rapprochement opéré entre la vulnérabilité et l'IPE y est différent, puisqu'il s'opère en élaborant les indicateurs de l'IPE en fonction de la vulnérabilité qu'ils impliquent. L'association

---

<sup>48</sup> « représente les attributs géographiques spécifiquement associé à chaque localisation »

<sup>49</sup> « De la même manière, la plupart des recherches actuelles s'intéressent à la disponibilité des ressources en eau en insistant sur la vulnérabilité des communautés face au manque physique d'eau. »

épistémologique suggérée par Fenwick (2010) et Manandhar et al. (2012) constitue aussi l'un des postulats théoriques de l'IVC : les différentes dimensions de la pauvreté en eau coïncident avec celles de la vulnérabilité. Néanmoins ces études n'interrogent pas explicitement le lien entre l'IPE et la vulnérabilité : elles le postulent. Or, l'IPE ne fait pas directement écho à la perspective MOVE qui met en évidence des défis méthodologiques importants (Section 1.1.2). La présente étude se penche sur ces questions.

**Problématique :**

Comment élaborer un diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilité liée aux pénuries en eau en considérant à la fois les différentes dimensions de la pénurie en eau, les facteurs clés de vulnérabilité, et les contraintes relatives à l'aide à la prise de décision ?

L'hypothèse considérée pour traiter cette problématique s'inspire de l'IVC de Sullivan et Meigh (2005) qui adapte l'IPE de manière à le rendre plus pertinent :

**Afin de réaliser un diagnostic de vulnérabilité sur les pénuries en eau au Mexique, la méthode de calcul de l'IPE peut être complétée en considérant les apports d'autres disciplines.**

**L'objectif de l'étude est alors d'adapter et de compléter l'indice en associant plusieurs méthodes de diagnostics** : au lieu d'ajouter une composante pour intégrer la dimension spatiale comme le font Sullivan et Meigh (2005) , l'IPE est notamment appliqué à travers des outils cartographiques (Section 1.4). Les concepteurs de l'IPE précisait en 2002 que plusieurs méthodes de calcul pouvaient être envisagées et attiraient notamment l'attention sur les alternatives cartographiques (Sullivan, 2002). De fait, l'étude s'inscrit dans la lignée de cette suggestion et adopte une démarche intrinsèquement interdisciplinaire et réflexive sur le calcul de l'IPE.

## **1.2 Opportunités de l'IPE pour diagnostiquer les pénuries en eau**

L'IPE considère « *both the physical and social sciences [and] intended to help this process of identifying those areas and communities where water is most needed, enabling a more equitable distribution of water to be achieved* »<sup>50</sup> (Sullivan, 2002). Il doit donc permettre d'une part de classer les espaces partout sur le globe terrestre en fonction de leur pauvreté en eau, et d'autre part de hiérarchiser les problèmes structureaux qui participent à la création du manque d'eau. En d'autres termes, il s'agit d'élaborer un outil interdisciplinaire de diagnostic comparatif, mondialement standardisé, dans une perspective de recherche action. Même si ce projet comprend certaines limites, il est d'autant plus intéressant qu'il a été conçu pour prendre une part déterminante dans l'aide à la prise de décision, et a plusieurs fois été appliqué dans ce sens.

### 1.2.1 *Qu'est-ce que l'IPE ? Les définitions et fondements d'un outil de diagnostics interdisciplinaire*

L'IPE considère le socioécosystème à travers le prisme de la pauvreté. Ce faisant, il érige l'usage de la ressource hydrique à des fins sanitaires, économiques et/ou environnementales comme un enjeu de développement. Outre la pertinence de cette approche dans le contexte actuel, cela permet d'inclure le nouvel indice dans un domaine d'étude qui s'est particulièrement développé depuis la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle : celui de la lutte contre la pauvreté. Cette perspective spécifique permet de comprendre la méthode de calcul de l'IPE détaillée à présent.

- Définition de pauvreté en eau employée dans l'IPE

L'IPE a été conçu dans le cadre des diagnostics destinés à comparer les territoires entre eux pour aider le processus de transformation de la gestion de l'eau. C'est pourquoi il a été conçu par une équipe constituée de chercheurs mais aussi d'institutions locales, nationales et internationales. Cette équipe a tout d'abord établi qu'étant donnés leurs impacts sur l'environnement, la santé, l'hygiène et le niveau de

---

<sup>50</sup> « conjointement les sciences physiques et sociales [et] cherche à aider le processus d'identification des aires et des communautés qui ont le plus besoin d'eau, favorisant de ce fait la mise en place d'une distribution plus équitable ».

vie économique, les usages de l'eau « *are prerequisites to an effective life* »<sup>51</sup> (Sullivan et al., 2003). Suite à ce constat il a de fait été décidé d'étendre le concept de pauvreté – habituellement réservé aux conditions matérielles et économiques d'existence – aux domaines de l'eau. Le terme pauvreté en eau est alors forgé en remplaçant le terme de pénurie, employé dans la tradition scientifique d'étude des problématiques hydrologiques, et en inscrivant la réflexion dans une autre lignée, celle des capacités d'Amartya Sen (Desai, 1995 ; Lallau et Rousseau, 2009). Dès lors, la pauvreté en eau, est définie comme une capacité insuffisante des populations pour accéder à l'eau et assurer leur bien-être notamment par le développement économique et industriel (Section 1.1.1). Ce cadre théorique fondamentalement déterminé par la collaboration sciences/société définit notamment la pauvreté en eau en fonction d'un ensemble de « capitaux physiques, monétaires, humains et sociaux » (Benoît, 2008).

Les multiples aspects de la pauvreté en eau ont alors été inventoriés dans une perspective interdisciplinaire : « *People may have to walk a long way to get it or even if they have access to water nearby, supplies may be limited for various reasons. People can also be 'water poor' because they are 'income poor'* »<sup>52</sup> (Lawrence et al., 2003). Il est notable à ce sujet, qu'en plus des aspects hydrologiques et socio-économiques considérés dans la pénurie en eau, les différents usages de la ressource ont aussi été pris en compte. Ils entrent de fait doublement dans les problématiques de pauvreté : d'une part directement à travers la consommation humaine de la ressource et ses usages domestiques intrinsèquement liés à la salubrité ; d'autre part indirectement à travers les activités économiques d'agriculture, d'élevage et d'industrie nécessaire à la reproduction socio-économique (Sullivan et al., 2002). De la même manière, une approche environnementale plus ample que celles menées dans le cadre des analyses de pénurie en eau est intégrée à l'IPE. La justification de cette perspective est que la reproduction sociale des populations les plus pauvres repose sur un usage direct de l'environnement, et que la vie végétale et animale en dépend directement. A travers la définition de ces usagers, la nécessité de préserver l'apport hydrologique nécessaire au maintien de l'environnement a ainsi été soulevée dans la lignée de l'Agenda 21 dès l'UNCED 1992 (United Nations, 1992).

Cet inventaire des différents aspects de la pauvreté en eau a ensuite été intégré dans un outil de diagnostic dont l'objectif est de donner du sens aux données. Et c'est donc en s'inscrivant dans la lignée

---

<sup>51</sup> « sont des prérequis à une vie décente ».

<sup>52</sup> « il arrive que les gens doivent parcourir à pied de longues distances pour la collecter ou bien, même s'ils ont un accès à l'eau proche, la ressource peut être limitée pour de multiples raisons. Les gens peuvent en outre être 'pauvres en eau' car ils sont 'économiquement pauvres' ».



des études de pénurie en eau qu'un indice a été développé dans l'objectif de comparer l'état de pénurie en eau entre pays et régions pour définir les zones d'intervention prioritaires... C'est ainsi que l'IPE a été formé à partir de cinq composantes : ressource, environnement, accès, capacité, usage (Abraham et al., 2002 ; Li et al., 2011 ; Rentería et Pérez, 2010 ; Sullivan, 2002 ; Wilk et Jonsson, 2013)<sup>53</sup>. Celles-ci reprennent les capitaux définis par Sen et ses successeurs tout en conservant une unité de sens propre, en vue de faciliter l'aide à la prise de décision (Tableau 2).

- Cinq composantes pour fonder l'IPE d'après Sullivan et al. (2002)

En accord avec l'inventaire précédemment mentionné, les composantes associent l'évaluation de la disponibilité physique de la ressource bien sûr, mais aussi de l'état de préservation de l'environnement, des ressources matérielles économiques et humaines de la société considérée, et des usages de l'eau.

| Composante de l'IPE | Contenu                                    | Capitaux                    |
|---------------------|--|-----------------------------|
| Ressource           | Quantité et Qualité de la ressource        | Naturel - Ressources en eau |
| Environnement       | Qualité de l'écosystème                    | Naturel                     |
| Accès               | Infrastructures d'approvisionnement en eau | Social – Financier          |
| Capacité            | Développement humain                       | Humain                      |
| Usage               | Valorisation de la ressource               | Physique – Financier        |

**Tableau 2 : Synthèse épistémologique de l'IPE, élaborée à partir de Sullivan et al. (2002)**

Elles sont caractérisées par les capitaux qui les composent, mais le Tableau 2 indique que les mêmes capitaux interviennent parfois dans différentes composantes. En somme, ils servent à l'élaboration théorique des composantes, mais en termes de méthodologie, d'autres cadres ont été définis. En l'occurrence, d'après Sullivan et al. (2002, p. 15) leur contenu est déterminé comme suit :

✓ « Ressource – Disponibilité physique des eaux de surface et des eaux souterraines ;

<sup>53</sup> (elles sont traditionnellement présentées dans un autre ordre)

- ✓ Accès – L’extension de l’accès à cette eau pour les usages humains ;
- ✓ Capacité – Effectivité de la capacité des gens à gérer l’eau ;
- ✓ Usage – La manière dont l’eau est utilisée à différentes fins ;
- ✓ Environnement – Le besoin d’allouer de l’eau pour les services « écosystémiques »

Il apparaît alors que les composantes de ressource et d’environnement s’intéressent au socioécosystème tandis que les trois autres se centrent sur le sociosystème (Sullivan et al., 2002). En termes méthodologique la difficulté est justement que l’élaboration de ces composantes est en elle-même interdisciplinaire et suscite des redondances mentionnées à l’heure de la conception de l’IPE et qui sont encore souvent débattues dans l’actualité (Van Der Vyver, 2015). Ce point sera commenté dans la Section 1.3, et à ce stade, ce qui importe c’est de noter que par-delà les différences de construction de ces composantes, elles constituent le principal point commun des études sur l’IPE.

De fait, lorsque ces cinq composantes sont modifiées, d’autres noms servent d’ailleurs à identifier les résultats. Ainsi, Cho et al. (2010) proposent de supprimer des composantes considérées comme superflues ou redondantes, et définissent donc un Indice de Pauvreté en Eau Simplifié (SWPI d’après son sigle anglais). Jemmali (2013) adopte une démarche similaire en proposant l’IPEg. Ainsi, les cinq composantes présentées constituent le fondement essentiel de l’IPE.

### 1.2.2 *Méthode de calcul de l’IPE : les étapes traditionnelles de l’analyse multicritères (AMC) appliquées à l’IPE*

Dans le cas de l’IPE, l’entreprise multicritère est particulièrement compliquée étant donné le caractère multisectoriel de l’indice : celui-ci implique de passer par une étape que n’incluent pas tous les indices, à savoir le choix des composantes (Sullivan, 2002). L’Indice de Développement Humain (IDH) par exemple comprend trois dimensions (éducation, économie, et mortalité infantile), qui sont synthétisées à travers trois indicateurs (ou quatre lorsque le coefficient de Gini est aussi intégré pour illustrer l’hétérogénéité socio-économique). Mais dans le cas de l’IPE les dimensions à intégrer sont bien plus nombreuses et hétéroclites (au total plus de 15 indicateurs). Elles sont donc regroupées dans des sous-

ensembles appelées composantes (qui elles, regroupent des indicateurs à la manière de l'IDH). Reposant sur un travail de définition des dimensions fondamentales du phénomène considéré, le choix des composantes a déjà été traité dans la Section 1.2.1. Il n'est donc pas re-détaillé ici, même si les paragraphes suivant expliquent que l'étude de la pauvreté en eau (et donc la définition des composantes) présente certaines dimensions abstraites qui s'ajoutent à la difficulté multisectorielle (Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et al., 2003).

Pour intégrer les cinq composantes qui le caractérisent, l'IPE est construit sous la forme d'un indice (Section 1.1.3). Cette section présente la construction méthodologique de cet indice en se centrant sur ces caractéristiques constantes, caractéristiques dont la rationalisation est d'autant plus importante et difficile dans le cadre d'un outil comme l'IPE (Sullivan et al., 2006).

- Première phase de l'analyse multicritères (AMC) appliquée dans l'IPE : une normalisation Min-Max

Comme tous les indices, il est donc construit au moyen d'une AMC qui permet d'élaborer les composantes et par extension l'IPE à partir de cinq séries d'indicateurs (commentés dans la Section 1.3 étant donné qu'ils ne sont pas constants d'une étude à l'autre). Cette méthode comprend une phase d'analyse préliminaire des indicateurs, appelée normalisation.

Comme il a été signalé dans la Section 1.1.3, la normalisation des indicateurs a vocation à les échelonner depuis les conditions moins favorables, jusqu'aux plus favorables et à les rendre comparables. Dans le cadre de l'étude du calcul de l'IPE, certains indicateurs sont élaborés de telle sorte qu'ils sont « *self-normalized* »<sup>54</sup> (Manandhar et al., 2012). C'est le cas des pourcentages, et donc de la plupart des taux comme celui de la couverture des services en eau courante et en drains, ou de mortalité infantile. De fait, ces indicateurs sont échelonnés de 0 à 100, et l'une ou l'autre de ces extrémités correspond aux conditions optimales de l'indicateur, tandis que l'autre correspond à ses conditions minimales. Mais pour les autres indicateurs, l'IPE exige d'appliquer une opération de normalisation.

---

<sup>54</sup> « auto-normalisés » : ils se présentent sous des formes numériques qui sont comprises entre un maxima et un minima préétablis.

En l'occurrence, cette phase est traditionnellement opérée à travers une approche Min-Max. En accord avec les recommandations de l'OCDE, elle est synthétisée dans l'équation suivante :

**Équation 1 : Normalisation à travers l'approche Min-Max (OECD et JRC, 2008)**

$$I_{qc} = (x_{qc} - \min_c(x_q)) / (\max_c(x_q) - \min_c(x_q))$$

Où  $I_{qc}$  correspond à la fonction normalisée de l'indicateur  $q$  en fonction des maxima et minima observés pour un territoire générique  $c$ ,  $X_{qc}$  correspond à la valeur initiale de l'indicateur,  $\min_c(x_q)$  et  $\max_c(x_q)$  correspondent respectivement au minima et maxima observé pour l'échantillon, correspond au maxima observé pour l'échantillon.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité : elle requiert simplement de définir les maxima et minima de l'échantillon et d'appliquer l'équation 1. Mais cette simplicité occasionne aussi une limite en ce qui concerne les possibilités de comparaisons des études entre elles (Section 1.3.2). Cette première étape permet d'obtenir des séries de nombres, comprises entre 0 et 100, où 0 représente le contexte le plus défavorable pour l'homme, et où 100 représente au contraire un contexte optimal.

Pour finaliser l'AMC, vient ensuite l'agrégation des indicateurs ainsi normalisés.

- Agrégation des indicateurs et des composantes : quelle équation de base pour l'IPE ?

Pour agréger les indicateurs, il s'agit d'appliquer l'équation de base correspondante. Sullivan et al. (2002) l'ont définie comme suit :

**Équation 2 : La formule de l'IPE**

$$IPE = \frac{W_R r + W_A a + W_C c + W_U u + W_E e}{W_R + W_A + W_C + W_U + W_E}$$

Où  $W_R$  est le coefficient appliqué au résultat obtenu pour la composante de ressource (r),  $W_A$  est le coefficient appliqué au résultat obtenu pour la composante d'accès (a),  $W_C$  est le coefficient appliqué au résultat obtenu pour la composante de capacité (c),  $W_U$  est le coefficient appliqué au résultat obtenu pour la composante d'usage (u) et  $W_E$  est le coefficient appliqué au résultat obtenu pour la composante d'environnement (e).

La formule n'intègre pas les indicateurs, mais les composantes. Cela confirme la complexité de l'IPE (qui regroupe les indicateurs dans différentes composantes) mais aussi le fait que les composantes sont le fondement principal de cet indice... A tel point que les équations relatives à l'agrégation des indicateurs ne sont même pas formulées. En l'occurrence la majorité des études reprennent la démarche de Sullivan et al. (2002), et appliquent des moyennes pondérées à l'ensemble des indicateurs d'une composante (en pondérant également les indicateurs au sein d'une composante). Après quoi le calcul de l'IPE est finalement terminé en agrégeant les composantes, à travers la formule déjà mentionnée, et qui correspond à une moyenne pondérée. Cependant là encore, il faut noter que l'équation de base ne précise pas le choix de la pondération associée à chaque composante et que cela pose question (Feitelson et Chenoweth, 2002).

Sullivan et al. (2002) mentionnaient à l'époque que plus de recherche devaient être menées afin de définir ces pondérations, et proposaient en attendant d'appliquer la même pondération à toutes les composantes. Cette proposition a été reprise dans plusieurs études et justifiée de la manière suivante : d'une part il ne s'agit pas de donner plus ou moins d'importance à l'une ou l'autre des composantes, et d'autre part cette alternative offre une grande transparence qui facilite la communication auprès des preneurs de décisions (Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Huang et al., 2017 ; Li et al., 2011 ; Manandhar et al., 2012). De fait les débats sont nombreux à ce sujet.

Même si les limites de cette alternative ont été plusieurs fois soulignées, la majeure partie des études attribuent la même pondération à toutes les composantes, reprenant ainsi la proposition initiale (Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Li et al., 2011 ; Manandhar et al., 2012). Face aux critiques, cette alternative est justifiée du point de vue épistémologique en faisant valoir l'intérêt de ne pas attribuer plus d'importance à l'une ou l'autre des composantes (Sullivan, 2002 ; Li, 2011). En outre, elle présente l'avantage de sa grande transparence, laquelle facilite la communication auprès des preneurs de décisions (Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Li et al., 2011 ; Manandhar et al., 2012). Cependant des

débats concernant ce choix de pondération des composantes de l'IPE ont été soulevés dès sa création (Molle et Mollinga, 2003a ; Parga et al., 2006 ; Sullivan et al., 2002). Il s'agit d'un des aspects qui a été le plus discuté, mais peu de propositions<sup>55</sup> ont trouvé un écho dans la littérature spécialisée (Cho et al., 2010 ; Van Der Vyver, 2012). Il faut d'ailleurs mentionner que ces débats se sont même étendus à la formule mathématique utilisée pour intégrer les composantes (Garriga et Foguet, 2010a ; Sullivan et Jemmali, 2014 ; Van Der Vyver, 2013b).

A ce stade, signalons que pour construire les indices, il existe des démarches et en particulier des traitements mathématiques spécifiques. Celles-ci concernent notamment en écologie des phénomènes exclusivement physiques/chimiques : dans ce cadre, il est en effet possible de comparer les résultats obtenus statistiquement avec des expérimentations concrètes (Krause et Boyle, 2005 ; Mayer, 1993). Ce faisant, l'équation est adaptée de sorte qu'il coïncide avec la réalité observée : les pondérations et les opérations statistiques sont ainsi testées et validées expérimentalement. Au contraire dans le cas de l'IPE, l'analyse est opérée sur des phénomènes multisectoriels (physique, chimie, économie, géographie etc.) et mêlent des dimensions matérielles et immatérielles. Cela complique la démarche et ne permet pas d'appliquer le type de validation précédemment mentionné. L'équation de base est par conséquent établie à partir d'une définition épistémologique du phénomène considéré (et non d'observations expérimentales). Cette démarche concerne aussi l'IDH, qui est certes critiqué, mais tout de même utilisé dans l'aide à la prise de décision (Mlote et al., 2002) : c'est d'ailleurs une démarche commune à tous les indices qui comprennent des dimensions sociales (Lebaron, 2011). Pour ces indices, l'observation expérimentale est remplacée par d'autres méthodes et certaines précautions servant à déterminer l'équation de base. Par exemple, comme dans le cas de la définition des indicateurs, il s'agit d'éviter les redondances conceptuelles, et les corrélations statistiques (Garriga et Foguet, 2010a). En outre, il est possible de comparer les résultats obtenus avec les représentations préexistantes du phénomène étudié, même si celles-ci sont par définition critiquables. En somme, l'IPE est donc calculé à travers une AMC spécifique dans laquelle plusieurs choix méthodologiques sont laissées au jugement des auteurs et dépendent donc de ce que l'étude cherche à démontrer (Garriga et Foguet, 2010a ; Li et al., 2011 ;

---

<sup>55</sup> La plupart d'entre elles dépendent du contexte local ou des données considérées, et ne sont donc pas a priori transposables d'une étude à l'autre.

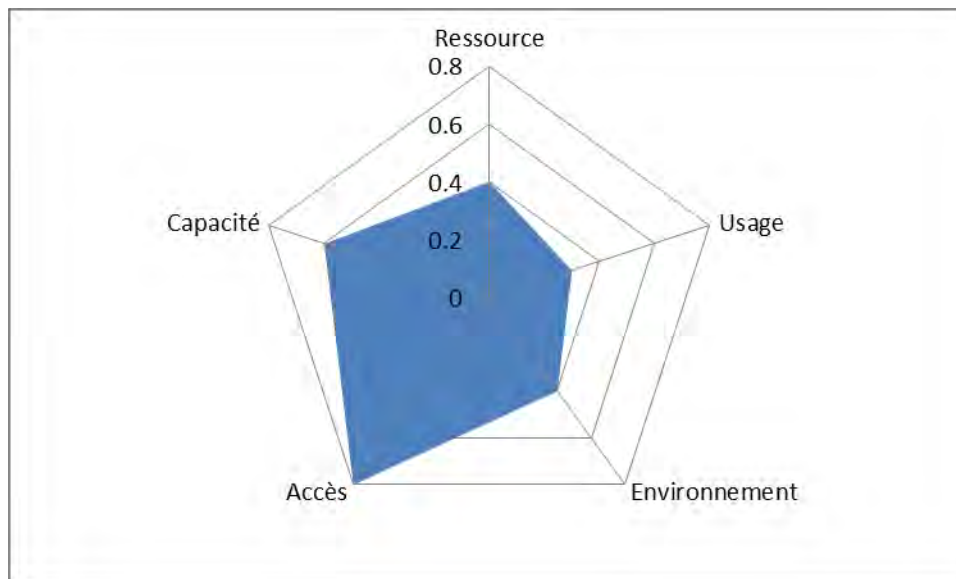
Vollmer et al., 2016). Et la suite de cette présentation indique qu'avec une méthodologie plus ou moins constante, l'IPE sert à démontrer plusieurs choses.

- Représentations finales de l'IPE

L'indice ainsi élaboré a été initialement proposé pour classer les territoires et les sociétés selon leur pauvreté en eau, et ce dans l'optique de constituer une base solide pour les stratégies rationnelles de gestion de cette ressource (Sullivan et al., 2002). Ce premier usage est mentionné et mis en avant dans toutes les études réalisées jusqu'à ce jour, même si la Section 1.3 indique que certains aspects de la méthodologie actuellement employée limitent la portée de l'indice dans ce sens. Dès lors, bien que la cartographie ne soit pas incluse dans la méthodologie de l'IPE, les résultats obtenus se prêtent volontiers à la retranscription cartographique qui présente un avantage certain dans la démarche de classification des espaces. De telle sorte que la plupart des calculs de l'IPE ont souvent conduit à cartographier les différences observées pour chacune des entités géographiques considérées (Garriga et Foguet, 2010a ; Heidecke, 2006 ; Sullivan et Jemmali, 2014 ; Sullivan et al., 2006). A ce sujet, il est notable que l'IPE a essentiellement été appliqué dans le cadre des unités administratives et politiques traditionnelles, à savoir : états, régions, communautés. Dans une certaine mesure cette stratégie s'accorde avec l'aide à la prise de décision, puisque les unités sont – par définition – des échelles de gestion de l'eau particulièrement notables. Mais d'un autre côté, comme la Section 1.3.1 l'indique, elle pose problème concernant la représentativité territoriale des résultats (Abraham et al., 2002 ; Nihila, 2012).

Parallèlement, l'IPE sert aussi à identifier les principaux facteurs de pauvreté en eau au sein des territoires étudiés. Beaucoup d'auteurs signalent d'ailleurs qu'en l'état, c'est son principal avantage (Manandhar et al., 2012 ; Parga, et al., 2006 ; Sullivan et al., 2003 ; Wilk et Jonsson, 2013). En l'occurrence, la méthode proposée par Sullivan a pour objectif de fournir un résultat synthétique : un chiffre qui permettrait d'intégrer tous les aspects de la pauvreté en eau. Mais la grande majorité des auteurs s'accordent à dire que ces résultats sont de fait trop synthétiques. Ainsi, les résultats obtenus séparément pour chaque composante sont-ils considérés comme plus pertinents que l'IPE lui-même (Maheswari et al., 2017). Dès lors, une autre représentation est ajoutée à la première : un graphique qui détaille les scores obtenus pour chaque composante isolément. Cette représentation, appelée version

étendue de l'IPE, permet donc de hiérarchiser les problèmes structureux qui déterminent la pauvreté en eau (Figure 2).



**Figure 2 : Représentation étendue de l'IPE (résultats aléatoires)**

Enfin, l'IPE est souvent présenté en associant la cartographie des résultats obtenus et la version étendue sous sa forme graphique, comme le fait El-gafy (2018). Cette double représentation, qui reste synthétique, semble particulièrement pertinente dans l'aide à la prise de décision. Elle permet de définir deux types de périmètres d'action prioritaires dans la gestion de l'eau : des territoires et des problématiques. Dans cette perspective une autre démarche semble intéressante : Nihila (2012) présente ainsi l'IPE sous une forme cartographique, mais l'auteure complète ces résultats synthétiques par des cartes relatives aux dégradations environnementales et non par des graphiques<sup>56</sup>. Cette remarque attire l'attention sur la grande diversité qui caractérise la littérature sur l'IPE.

### 1.2.3 Applications de l'IPE : un indice aux usages multiples

<sup>56</sup> L'étude de Nihila (2012) s'inspire des travaux de Cullis (2005) concernant le *water poverty mapping* (présenté dans la section 1.3.1).



Les études concernant l'IPE sont caractérisées par une variété d'échelle, de démarche et d'usages. La proposition théorique effectuée en 2002, considérant trois échelles principales d'analyse – une locale, une nationale et une hydrologique à savoir celle du bassin versant – mentionnait déjà cette diversité : elle était justement présentée comme un avantage et comme un enjeu scientifique de taille (Sullivan et al., 2002, 2006). Cette caractéristique explique en grande partie le fait que la sélection d'indicateurs varie notablement d'une étude à l'autre : en effet, selon le lieu et l'échelle adoptés pour les calculs la pertinence des indicateurs, la source des données et les enjeux de calculs changent.

- Différents territoires / différentes problématiques

Comme les Sections 1.1.3 et 1.2.1 l'ont déjà signalé, l'IPE sert à inscrire les débats concernant la gestion de l'eau dans un cadre commun, regroupant les perspectives politiques et scientifiques afin de la faire évoluer. Pour ce faire outre sa validité scientifique, l'outil doit aussi être représentatif, compréhensible, et accepté par ses utilisateurs. Néanmoins cette entreprise est d'autant plus difficile que l'IPE a aussi vocation à être appliqué de par le monde. Il a de fait été calculé dans plusieurs pays, et à différentes échelles (

Tableau 3). Or, selon les échelles et les territoires considérés, les problématiques de gestion de l'eau varient notablement, et les données et les représentations des utilisateurs de l'IPE aussi.

| Référence  | Echelle                | Pays                                  |
|--|------------------------|---------------------------------------|
| (Abraham et al., 2002 ; Abraham et al., 2005)        | Locale                 | Argentine                             |
| (Lawrence et al., 2003)                              | Nationale              | Tous                                  |
| (Sullivan et al., 2003)                              | Locale                 | Afrique du Sud, Tanzanie et Sri Lanka |
| (Cullis et Gorgens, 2006)                            | Municipale             | Afrique du Sud                        |
| (Heidecke, 2006)                                     | Municipale             | Benin                                 |
| (Parga et al., 2006)                                 | Municipale             | Chili                                 |
| (Castelazo et al., 2007)                             | Communauté             | Mexique                               |
| (Rentería et Pérez, 2010)                            | Etats fédérés          | Mexique                               |
| (Fenwick, 2010)                                      | Local et Etats fédérés | Mexique                               |
| (Li et al., 2011)                                    | District               | Chine                                 |
| (Jemmali et Matoussi, 2013 ; Jemmali et Salah, 2012) | Locale                 | Tunisie                               |
| (Manandhar et al., 2012)                             | District               | Népal                                 |
|  | Bassin Versant         | Népal                                 |
| (Van Der Vyver, 2012, 2013a, 2013b, 2015)            | Villes et région       | Afrique du Sud                        |

|                              |                |                                |
|------------------------------|----------------|--------------------------------|
| (López et al., 2013 ; 2015)  | Bassin Versant | Mexique                        |
| (Wilk et Jonsson, 2013)      | Locale         | Inde                           |
| (Sullivan et Jemmali, 2014)  | Nationale      | Moyen Orient et Afrique du Sud |
| (Giné et Pérez-Fouget, 2015) | Locale         | Bolivie                        |
|                              | Bassin Versant | Pérou et Equateur              |
| (Pineda, 2015)               | Municipale     | Mexique                        |
| (Gong et al., 2017)          | Provinces      | Chine                          |
|                              | Bassin Versant |                                |
| (Huang et al., 2017)         | Bassin Versant | Chine                          |
| (Maheswari et al., 2017)     | Locale         | Inde                           |
| (El-gafy, 2018)              | Gouvernorats   | Egypte                         |

**Tableau 3 : Echelles et pays des applications de l'IPE**

Ainsi, comme le signalent (Gong et al., 2017 ; Li et al., 2011), il arrive que certains indicateurs indispensables pour l'élaboration d'un IPE dans certaines régions du monde ne soient pas pertinents dans d'autres. Les indicateurs d'accès constituent à ce sujet des exemples significatifs. Ainsi, selon les contextes l'accès à l'eau dite potable peut correspondre à une desserte directe dans le foyer – mesurable soit en fonction de la constance du service soit en fonction du taux de connexion des logements aux infrastructures correspondantes – alors que dans d'autres contextes certains individus de la famille – souvent les femmes – doivent aller chercher l'eau à pied (et que la mesure est donc relative à la distance de la source ou au temps de marche nécessaire pour l'atteindre). D'un autre côté, l'accès à l'irrigation par exemple est un indicateur significatif en milieu rural alors qu'en milieu urbain il est inadéquat. En outre, les indicateurs disponibles et pertinents changent aussi selon les échelles (Fenwick, 2010).

A l'image de ces remarques, l'IPE comprend donc un défi que l'on peut résumer de la sorte : comment faire coexister les objectifs de standardisation – mondiale – de la méthode avec ceux de pertinence et de représentativité territoriale intrinsèquement liés à l'aide à la prise de décision ? (Sullivan et al., 2003) avait signalé ce défi et prescrit le besoin de poursuivre les réflexions et la collaboration avec les autorités notamment sur la question des bases de données et des intentions de calculs. C'est ce qui est présentement proposé.

- Quand les échelles déterminent les sources : la diversité des démarches

Les études considérées comme les références de l'IPE ont été menées aux échelles internationales et locales. En l'occurrence Sullivan a calculé l'IPE dans diverses communautés en Tanzanie, au Sri Lanka et en Afrique du Sud (Sullivan et al., 2003). Pour cela, les informations étaient partiellement collectées par des enquêtes directes auprès des habitants. Et il faut noter que l'analyse a été effectuée pour offrir des solutions de diagnostics et d'action dans des communautés particulièrement affectées par les problématiques hydrologiques et la marginalisation (Sullivan, 2000). En d'autres termes, l'IPE opérée localement avait vocation à remplir un manque de diagnostic moderne et systématique. Lawrence, quant à lui l'a appliqué à l'échelle internationale (Lawrence et al., 2003). Dans ces conditions, l'étude correspond à cette échelle à l'un des rares suivis systématiques de la pauvreté en eau comprise en tant que telle et de manière interdisciplinaire (Sullivan et al., 2006). Les données ont alors été collectées directement auprès d'états ou d'organismes internationaux, seuls détenteurs de telles ressources, cependant, l'étude s'inscrivait aussi dans le cadre d'une gestion balbutiante.

Au contraire, lorsqu'il s'agit d'appliquer l'IPE à des niveaux intermédiaires, nationaux, municipaux ou régionaux, les données et les attentes sont, de fait, différentes. Au Benin par exemple, il existe des « *water committes* »<sup>57</sup> ; lesquels effectuent un suivi plus ou moins exhaustif, pour gérer les ressources et adapter la gestion (Heidecke, 2006). L'étude ainsi menée, part donc de bases de données déjà existantes et qui interviennent directement dans la gestion territoriale et plus ou moins directement dans la gestion de l'eau. En tout cas, l'IPE ne représente pas dans ce cadre une démarche isolée, inédite ; il s'inscrit au contraire dans une dynamique de diagnostic déjà existante. De la même manière, l'étude d'Abraham et al. (2005) s'inscrit dans le cadre de la gestion de l'eau en Argentine. Cela constitue une différence non-négligeable, qui a néanmoins été peu étudiée jusqu'ici. Pourtant elle est lourde de conséquences car elle génère des différences en termes de bases de données.

Aux échelles régionales, municipales et nationales (appelées échelles régionales dans cette étude pour plus de fluidité) notamment, la collecte de données de première main représentant un travail pharaonique, les indicateurs de l'IPE sont élaborés en intégrant les données publiques (Abraham et al., 2005 ; Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Lawrence et al., 2003). Au contraire, à l'échelle locale celles-ci ne sont employées que pour élaborer certains indicateurs, souvent les indicateurs

---

<sup>57</sup> « comités d'eau ».

environnementaux qui s'évaluent sur des temps longs<sup>58</sup>. Ces bases de données présentent l'avantage d'être alimentées à grande échelle et faciles d'accès (Van Der Vyver, 2012). En outre, elles regroupent généralement les différents aspects de la pauvreté en eau, et leur utilisation constitue un argument en faveur de la co-construction de l'indice ainsi que de son utilisation par les usagers. Cependant, elles présentent aussi l'inconvénient de manquer d'uniformisation. Malgré les récentes démarches adoptées dans ce domaine, toutes les autorités publiques n'élaborent pas en effet les mêmes suivis. En outre, ceux-ci diffèrent des analyses effectuées aux échelles locales et la pertinence même de certains indicateurs élaborés par ces autorités finit par poser question (Section 1.3.2). Comme conséquence directe de cela, les applications de l'indice effectuées à différents endroits du globe ou à différentes échelles ne sont pas comparables entre elles (Garriga et Foguet, 2010a ; Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Komnenic et al., 2009 ; Manandhar et al., 2012 ; Sullivan et al., 2003). Cela constitue un inconvénient de taille pour cet outil à vocation comparative. Et cette limite en termes de répliquabilité est un frein majeur pour les consensus concernant l'IPE, puisqu'il restreint notablement les discussions entre les études.

- Construction d'un indice de pauvreté en eau : entre challenges scientifiques et enjeux de gestion

En conséquence de la diversité des échelles, des territoires et des sources avec lesquels il est appliqué, le calcul de l'IPE présentent des variations notables et soulèvent de nombreuses discussions (Garriga et Foguet, 2010a ; Gong et al., 2017 ; Jemmali et Matoussi, 2012 ; Sullivan et al., 2002, 2006). A travers les études les consensus restent limités ; à tel point que la flexibilité méthodologique peut être considérée comme une des caractéristiques essentielles de l'IPE. Sans ôter son importance à l'IPE, ces observations sont à prendre en compte à l'heure d'appliquer un diagnostic, et de valoriser, communiquer ou comparer les résultats obtenus (Nihila, 2012). Dans ce contexte la transparence des objectifs fixés pour le calcul de l'IPE est essentielle car ils déterminent bon nombre de choix méthodologiques (Sullivan et Meigh, 2005 ; Vollmer et al., 2016). Ceux-ci représentent d'ailleurs autant d'enjeux de la recherche actuelle concernant l'élaboration de diagnostic de pauvreté en eau dans le cadre de l'aide à la prise de décision.

---

<sup>58</sup> L'évaluation des quantités d'eau notamment demande une planification longue pour ne pas tomber dans le piège des variations saisonnières.

Dans la diversité des démarches, deux grands ensembles se démarquent. En effet, l'IPE est parfois calculé comme un outil politique (Rentería et Pérez, 2010 ; Sullivan, 2000) mais d'autres études l'abordent plutôt comme un prototype de diagnostic interdisciplinaire de la pauvreté en eau (Cho et al., 2010 ; Garriga et Foguet, 2010a ; Maheswari et al., 2017 ; Van Der Vyver, 2013a). Les deux démarches se complètent, et peuvent d'ailleurs être menées en parallèle comme dans le cas de Sullivan et Meigh (2005), ou Sullivan et Jemmali (2014). Elles restent d'ailleurs toutes deux liées à l'aide à la prise de décision, mais dans le premier elle s'effectue directement, alors que dans l'autre elle est indirecte.

Le cadre de la collaboration indirecte présente une réflexivité notable : il permet d'alimenter les débats épistémologiques et méthodologiques concernant les diagnostics de pauvreté en eau. De fait, certaines études font avancer la méthodologie à partir d'outils qui restent l'apanage de la communauté scientifique. Plusieurs d'entre elles ont procédé pour cela à des applications statistique voire cartographiques de l'IPE (Cullis, 2005 ; Garriga et Foguet, 2010a ; Heidecke, 2006). Heidecke (2006) compare notamment les classifications territoriales obtenues, pour discuter des méthodes de pondération employées, et de l'utilisation de la composante de capacité. Tandis que Garriga et Foguet (2010a) opèrent des analyses exclusivement statistiques et Cullis et Gorgens (2006) s'intéressent à la construction cartographique de l'IPE. Ces études rendent à l'IPE un intérêt comparatif : de telles démarches permettent de synthétiser et de comparer différents diagnostics relatifs à un territoire. Cela permet de faire avancer les discussions sur les outils proposés par la communauté scientifique, faisant donc avancer les débats scientifiques d'une part, et la négociation territoriale de l'autre (Garriga et Foguet, 2010a). Néanmoins, les adaptations qui sont effectivement apportés à la méthode ne trouvent pas toujours leur place dans des débats formalisés.

La présente étude qui interroge la construction de diagnostic interdisciplinaire visant l'aide à la prise de décision s'inscrit dans la lignée de ces démarches réflexives. Elle s'intéresse en particulier aux approches régionales qui font intervenir une collaboration indirecte avec les autorités publiques. Plusieurs méthodes de calcul de l'IPE sont testées et discutées : elles sont fondées à partir des débats portant sur l'interdisciplinarité et la représentativité territoriale de l'indice.

### 1.3 Limites et enjeux actuels de la construction d'un indice tel que l'IPE aux échelles régionales et nationales

L'IPE qui rencontre beaucoup de succès, suscite aussi de nombreuses questions : certaines d'entre elles sont abordées au cours de débats formels, mais d'autres adoptent des formes plus latentes. En l'occurrence, plusieurs limites sont mentionnées en ce qui concerne la représentativité territoriale de l'IPE, mais aussi en ce qui concerne son interdisciplinarité.

Elles apparaissent concrètement à travers des adaptations de la méthode originale, et touchent des domaines aussi divers que les équations de normalisation et d'agrégation employées dans le calcul de l'IPE, la construction des composantes et des indicateurs, ainsi que la définition des unités de calcul (Anju et al., 2017). Comme le donne à voir cette section, il s'agit d'aspects fondamentaux pour l'uniformisation et la pertinence de l'indice.

#### 1.3.1 *Quelle représentativité territoriale pour l'IPE ? Quand on aborde la question des simplifications à partir de considérations statistiques et géographiques*

Les résultats synthétiques de l'IPE sont parfois mis en cause pour leur simplification de la réalité, comme c'est le cas pour tous les indices (Molle et Mollinga, 2003b). Cette question est notamment soulevée au niveau des représentations finales de l'IPE (Section 1.2.3). Mais elle transparaît aussi dans des interrogations sur la méthode de calcul. En particulier, la littérature spécialisée souligne le caractère moyenné des résultats et propose à ce sujet d'adapter la formule d'agrégation de l'IPE (Garriga et Foguet, 2010b ; Manandhar et al., 2012 ; Van Der Vyver, 2013b). De plus, il apparaît que l'échelle de calcul régionale, étant donné les unités de calcul qu'elle implique oriente les domaines d'étude de la pauvreté en eau (Cullis et Gorgens, 2006 ; Van Der Vyver et Jordaan, 2011). Ce faisant, elle finit par interroger la représentativité territoriale des résultats.

- Formules de calcul et uniformisation des résultats

La formule de l'IPE a été critiquée par Garriga et Foguet (2010a) au nom de la compensation qui s'opère entre les différentes composantes. La compensation est un mécanisme statistique qui neutralise « *a low suitability score of one factor by a high suitability score of a another factor* » (Paegelow et Olmedo,

2005). En l'occurrence, en opérant une moyenne pondérée pour agréger les composantes entre elles, la formule de Sullivan et al. (2003) gomme particulièrement l'impact des valeurs les plus basses. Cela nuit à l'indice qui perd de fait une partie de sa représentativité (Garriga et Foguet, 2010b). Or d'autres opérations statistiques peuvent permettre de réduire ladite compensation dans l'opération de l'AMC. C'est ce que proposent Garriga et Foguet (2010a) en remplaçant l'opération additive par une fonction multiplicative dans l'équation de base de l'IPE. Avec cette adaptation qui a rencontré un succès notable (Anju et al., 2017), l'IPE dit WPIg est calculé à travers l'équation suivante :

**Équation 3 : Alternative multiplicative de l'IPE (Garriga et Foguet, 2010b)<sup>59</sup>**

$$\text{IPEg} = R^{W_r} \times A^{W_a} \times C^{W_c} \times U^{W_u} \times M^{W_m}$$

A travers cette seconde formule la compensation existe encore, mais elle est significativement réduite. Le tableau 2 montre comment elle transforme les résultats, en faisant varier des valeurs fictives pour les cinq composantes de l'IPE. Le postulat adopté présentement est que deux composantes aient des valeurs particulièrement basses tandis que les autres sont plutôt hautes. Dans ce cadre, la question de la compensation se pose dans les termes suivants : laquelle des deux équations rend visible les valeurs basses ? Pour y répondre quatre exemples sont comparés entre eux. Dans le cas de l'exemple 1, les calculs se développent de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{IPE} &= 0,7 * 0,2 + 0,7 * 0,2 + 0,8 * 0,2 + 0,1 * 0,2 + 0,2 * 0,2 \\ &= 0,14 + 0,14 + 0,16 + 0,02 + 0,04 \\ &= 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IPEg} &= 0,7^{0,2} * 0,7^{0,2} * 0,8^{0,2} * 0,1^{0,2} * 0,2^{0,2} \\ &= 0,93 * 0,93 * 0,96 * 0,63 * 0,72 \end{aligned}$$

---

<sup>59</sup> Où « r » constitue le résultat obtenu pour la composante de ressource, et «  $W_R$  », est le coefficient associé à cette composante, où « a » constitue le résultat obtenu pour la composante d'accès, et «  $W_A$  », est le coefficient associé à cette composante, où « c » constitue le résultat obtenu pour la composante de capacité, et «  $W_C$  », est le coefficient associé à cette composante, où « u » constitue le résultat obtenu pour la composante d'usage, et «  $W_U$  », est le coefficient associé à cette composante, et où « e » constitue le résultat obtenu pour la composante d'environnement, et «  $W_E$  », est le coefficient associé à cette composante.

= 0,38

Dans un premier temps, en utilisant des puissances (au lieu des pondérations traditionnelles) il apparaît que l'IPEg renforce l'écart entre les valeurs fortes et les valeurs faibles<sup>60</sup>. Dès lors l'impact des valeurs extrêmes est plus difficilement compensable dans cette alternative que dans l'IPE. Dans un second temps, l'utilisation d'une opération multiplicative (au lieu d'une opération additive) étend l'éventail des résultats et les rend donc plus sensibles à ces mêmes valeurs. L'association de ces deux phénomènes statistiques explique que l'IPEg soit notablement inférieur à l'IPE dans l'exemple 1 : il rend de ce fait plus visible les valeurs extrêmement basses. En outre, cela explique la plus grande variation existant entre les IPEg qu'entre les IPE des exemples 1 et 2. En effet, l'augmentation d'un seul dixième sur une valeur basse n'augmente l'IPE que de 0.4, alors qu'elle augmente l'IPEg de plus du double (0.9). En revanche, si l'augmentation d'un dixième est appliquée sur une valeur haute (comme dans l'exemple 3), l'IPE varie plus que l'IPEg. Enfin, l'exemple 4 permet de confirmer que face à des valeurs moyennes les IPE et IPEg ont des comportements notablement similaires.

|           | Composante |     |     |     |     | IPE<br>(Equation 2) | IPEg<br>(Equation 3) |
|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|---------------------|----------------------|
|           | C          | A   | U   | R   | E   |                     |                      |
| Exemple 1 | 0.7        | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.5                 | 0.38                 |
| Exemple 2 | 0.7        | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.3 | 0.54                | 0.47                 |
| Exemple 3 | 0.8        | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.52                | 0.39                 |
| Exemple 4 | 0.7        | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.64                | 0.63                 |

**Table 1 : Impact de la formule multiplicative sur les résultats de l'IPE**

En somme, en réduisant la compensation des facteurs caractérisés par des valeurs extrêmes, l'équation de Garriga et Foguet (2010a) rend plus visible les valeurs basses que l'équation de Sullivan et al. (2003).

Ces perspectives statistiques sont pleines de potentiel pour faire ressortir les enjeux problématiques (la Section 1.4.2 présente d'autres alternatives qui permettent d'adapter à volonté le niveau de compensation entre les facteurs). C'est pourquoi elles ont été reprises notamment dans les travaux de Van Der Vyver (2013a, 2013b) et de Huang et al. (2017). Dans ces études, les auteurs comparent et discutent formellement les résultats obtenus avec les approches agrégatives et multiplicatives. Mais

<sup>60</sup> Cet écart se compte en centièmes de points dans le cas de l'IPE, alors qu'il s'agit de plusieurs dixièmes de point dans le cas du IPEg.



d'autres limites apparaissent de manière moins informelle dans la littérature spécialisée : en particulier, la forme synthétique de l'IPE tend à uniformiser les territoires et les problématiques étudiés.

- Quelles visibilitées pour les enjeux environnementaux, agricoles et ruraux dans l'IPE ?

De fait, l'indice est calculé de façon à attribuer un score final unique à chaque unité de gestion (Section 1.2.2). La littérature spécialisée signale explicitement que cette forme finale pose question en termes de clarté ; des alternatives ont d'ailleurs été développées pour remédier à cette question (Sections 1.2.3). Mais il convient de signaler une autre limite à ce sujet : bien souvent, le calcul de l'IPE est opéré pour des échelles de gestion qui impliquent de sacrifier la visibilité de certaines conjonctures environnementales, et génèrent aussi des impasses sur des thématiques associées aux milieux agricoles et ruraux.

Tout d'abord, les problématiques environnementales transcendent les unités de gestion les plus classiques qui sont définies en fonction de délimitations géopolitiques (Garriga et Foguet, 2010b). Si les écosystèmes sont impactés par les politiques de gestion déployées dans ces unités, un certain nombre de caractéristiques environnementales (morphologiques, climatiques, etc.) engendrent des continuités/discontinuités de part et d'autres des frontières administratives. De fait, l'intégration des enjeux environnementaux constitue un défi méthodologique de taille pour l'IPE (Sections 1.3.2 et 1.3.3). Certaines considérations épistémologiques le rendent secondaire, mais d'autres le place au contraire au cœur de la construction de l'IPE.

En l'occurrence, le « *water poverty mapping* »<sup>61</sup>, s'inscrit dans la lignée de l'IPE puisqu'il utilise les mêmes composantes que celui-ci pour évaluer la pauvreté en eau (Cullis et O'Regan, 2004). Mais il s'en distingue en réduisant chaque composante à un seul indicateur et en employant aussi des bases de données et des analyses cartographiques pour élaborer les indicateurs des composantes de ressource et d'environnement. Néanmoins, le *water poverty mapping* ne solutionne pas entièrement la question des indicateurs environnementaux. En effet, Cullis et Gorgens (2006) transcrivent finalement les résultats au

---

<sup>61</sup> « Cartographie de la Pauvreté en Eau » : le terme anglais est présentement conservé afin de distinguer cette démarche dans le cadre des travaux cartographiques concernant l'IPE. De fait, le *Water Poverty Mapping* est développé en simplifiant les composantes de l'IPE au point de les réduire à un seul indicateur.

niveau des unités administratives. Cela conduit à sacrifier la précision des indicateurs cartographiques, en uniformisant les diverses valeurs existantes pour chaque unité de calcul. Même dans ce cas, la représentativité de l'indice se voit donc limitée du point de vue de ce que la littérature spécialisée appelle les continuités spatiales, relatives aux dynamiques hydro-environnementales (Section 1.4.2).

De même que les dynamiques environnementales transcendent les frontières géopolitiques, le développement ne s'exprime pas de manière homogène au sein des entités géopolitiques. Des pôles se développent particulièrement au sein d'espaces eux-mêmes plus ou moins développés, et connectés à ces pôles. Cela génère différents enjeux de gestion. En ce qui concerne les pénuries en eau certains défis singularisent les milieux agricoles et ruraux (Section 1.1.1).

Dans les territoires agricoles, il existe des enjeux de gestions spécifiques en ce qui concerne l'accès aux infrastructures d'irrigation et les contaminations de la ressource (United Nations, 2017 ; UNSG, 2016). Cependant les études de l'IPE n'incluent pas systématiquement ces objets d'études. Tandis que certains auteurs comme Heidecke (2006), Hatem et Salah Matoussi (2012), Gong et al. ( 2017) ou Lawrence, et al. (2003) emploient des indicateurs d'accès à l'irrigation ou de contamination agricoles, d'autres auteurs les excluent totalement des calculs (Fenwick, 2010 ; Rentería et Pérez, 2010). A ce sujet, il faut noter une inclusion croissante de ces thématiques dans les études les plus récentes (Anju et al., 2017 ; Fenwick, 2010 ; Gong et al., 2017 ; Jemmali et Matoussi, 2012). Les auteurs ne discutent pas explicitement cette stratégie : il s'agit plutôt d'une tendance qui semble néanmoins attirer l'attention sur une problématique de gestion importante.

De manière Annexe 1, les United Nations (2017) signalent que le développement de capacités et d'infrastructures d'accès à l'eau soulèvent des questions spécifiques dans les milieux ruraux. Dans le cadre de l'IPE Gong et al. (2017) ont récemment insisté sur ce point en employant le taux d'urbanisation dans les indicateurs de la composante d'accès : ce faisant, ils assimilent directement l'urbanisation avec l'accès aux infrastructures. Cependant peu d'études de l'IPE distinguent effectivement les contextes urbains et ruraux. Outre Gong et al. (2017), Sullivan et al. (2002) et Heidecke (2006) font exception en ce sens, en incluant deux indicateurs d'accès aux réseaux (d'eau et d'assainissement) : l'un relatif aux territoires urbains, et l'autre aux territoires ruraux. Mais la majeure partie des auteurs n'appliquent pas de distinction de ce type ; ce faisant, ils font disparaître les problématiques rurales (Garriga et Foguet, 2010a ; Li et al., 2011 ; López et al., 2013).

En somme, les études portant sur l'IPE n'accordent pas toute la même place aux problématiques environnementales, agricoles et rurales : elles sont parfois mises en avant, mais d'autres fois elles disparaissent totalement. Dans ce contexte, la visibilité accordée à ces problématiques varie notamment avec les échelles, et les unités de calcul de l'indice.

- Des unités de calcul réduisant la représentativité territoriale de l'IPE aux échelles régionales

Comme il a été mentionné dans la Section 1.2.3, l'IPE est calculé à plusieurs types d'échelles : locales, régionales, nationales voire internationales. Les études menées à des échelles locales considèrent par définition des territoires relativement homogènes où s'expriment des enjeux de gestion relativement précis (Maheswari et al., 2017 ; Nihila, 2012). Au contraire, dans les calculs effectués aux échelles régionales, les territoires considérés sont plus étendus mais aussi plus hétérogènes : ils associent différents écosystèmes, mais aussi différents sociosystèmes. Dans ce contexte les problématiques de gestion sont nombreuses, et leur visibilité pose particulièrement question.

En raison de la disponibilité des données et de la perspective d'aide à la prise de décision notamment, les études de l'IPE élaborées aux échelles régionales sont appliquées à des unités prédéfinies. Elles correspondent aux entités administratives : municipalité, districts, états, nations (Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Lawrence et al., 2003 ; Manandhar et al., 2012 ; Rentería et Pérez, 2010), ou bien à des bassins versants (Giné et Pérez-Fouget, 2015 ; Manandhar et al., 2012). Autrement dit, échelles et unités de calculs sont entièrement confondues, et identifiées aux entités administratives. Ce faisant, les études régionales de l'IPE leur attribue une valeur unique pour chaque indicateur ou pour chaque composante, de telle sorte qu'elles homogénéisent les diverses réalités qu'elles recouvrent. Le constat de cette limite pousse Wilk et Jonsson (2013) et Fenwick (2010) à associer deux calculs de l'IPE : l'un mené à l'échelle régionale et l'autre à l'échelle locale. Cette démarche interpelle sur la complémentarité des résultats et l'intérêt d'associer différentes échelles pour augmenter la représentativité territoriale des diagnostics. Une alternative développée localement pour construire les unités de calcul comprend des apports intéressants pour des calculs effectués aux échelles régionales.

Abraham et al. (2002, 2005) réfléchissent au problème de la représentativité territoriale de l'IPE et théorisent l'élaboration des unités de calcul. Il s'agit de définir des unités qui divisent les entités

administratives. Ainsi, les auteurs construisent des Unités Environnementales de Référence (UAR d'après son sigle espagnol) conçue de manière relativement homogène tant du point social que du point de vue environnemental. Pour ce faire les auteurs analysent la constitution du territoire de manière préliminaire au calcul de l'IPE. Dans ce cadre, ils divisent la zone d'étude en s'intéressant tant à des facteurs environnementaux et paysagers qu'à des facteurs sociaux et ethniques. Cette démarche solutionne de manière intéressante les problèmes de représentativité de l'IPE qui est calculé pour chaque UAR. Néanmoins, dans le cas d'Abraham et al. (2002, 2005) elle repose sur un vaste travail de reconnaissance du terrain qui présenterait un caractère particulièrement chronophage à des échelles plus grandes, où une multitude de paramètres et d'échelles devraient être considérés. Malgré ces limites, et même si elle n'a pas été explicitement reprise, cette stratégie est intéressante. En l'occurrence, les approches cartographiques apportent des solutions pour l'adapter à des échelles régionales (Section 1.4.2).

En conclusion, l'un des challenges du calcul de l'IPE à l'échelle régionale repose sur la définition d'unités de calcul qui puissent être représentatives pour des territoires hétérogènes. Cette question est d'autant plus importante qu'elle interroge la visibilité de trois enjeux de pauvreté en eau agricoles, ruraux et environnementaux. En d'autres termes, elle soulève des interrogations concernant les propres objets d'études de l'IPE.

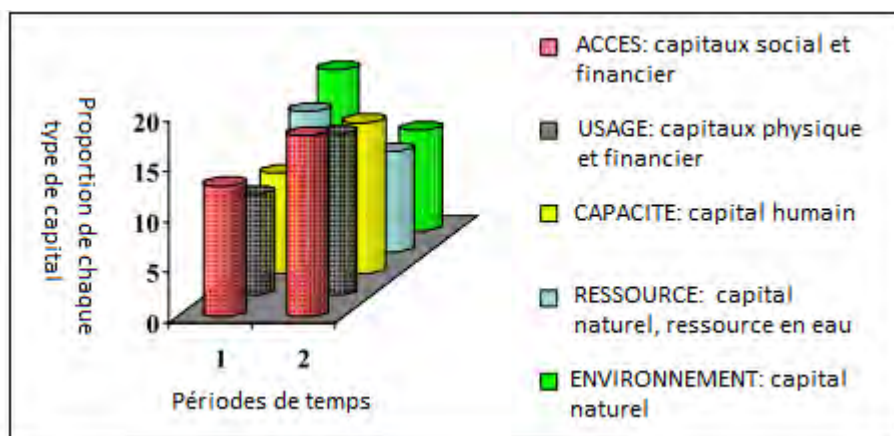
### *1.3.2 Limites fondamentales de la composition de l'IPE : des freins pour l'interdisciplinarité et la répliquabilité de l'indice*

En associant des analyses en provenance de disciplines différentes, l'indice sort les terminologies et les méthodes de leur contexte. De telle sorte qu'il remet en cause certains acquis épistémologiques, et que le travail de définition devient équivoque. En outre, le manque d'uniformisation des données employées pour le calcul de l'indice freine les discussions concernant la construction des indicateurs ainsi que leur normalisation. C'est ce que donne à voir cette section, qui passe en revue la définition des composantes de l'IPE ainsi que les lignes directrices employées relativement à la normalisation mais aussi à la construction des indicateurs.

- La structure de l'IPE en question

Sullivan et al. (2006) signalent qu'il est particulièrement important mais aussi délicat de préserver la cohérence méthodologique et conceptuelle pour élaborer un indice tel que l'IPE. Cette remarque résonne en particulier dans la détermination des composantes. A ce sujet, les concepteurs de l'indice présentent un graphique, repris dans la Figure 3 (Sullivan et al., 2002) :

*« Impoverished communities are by definition short of some or all of the livelihood capital types. Their local environmental, human and social capitals have not been mobilized to create adequate physical (manufactured) and financial capital. As development occurs over time, there will be inevitable changes in the extent and availability of these capitals, and such changes can be illustrated as shown in Figure 1. To address any kind of poverty, access to these capital types must be redistributed to ensure a more equitable outcome for all.<sup>62</sup> »*



**Figure 3 : Comment le développement impacte les composantes de l'IPE et les capitaux qui déterminent la pauvreté en eau, adapté de (Sullivan et al., 2002 ; Sullivan et Meigh, 2005)**

<sup>62</sup> « Les communautés considérées comme pauvres sont, par définition, dépourvues de tout ou partie des différents capitaux de subsistance. Leurs capitaux environnementaux, humains et sociaux locaux n'ont pas été mobilisés pour créer un capital physique (manufacturé) et financier adéquat. Au fur et à mesure que le développement s'opère, l'ampleur et la disponibilité de ces capitaux se transforment inévitablement, ces transformations peuvent être représentées comme le montre la figure 1. Pour lutter contre toutes les formes de pauvreté, l'accès à ces différents capitaux doit être redistribué afin de garantir un résultat plus équitable pour tous. »

Dans ces termes, le développement est compris comme le processus de création de capitaux financiers, physiques (manufacturés), social et humain. La Figure 3 indique qu'il affecte positivement les composantes d'accès, de capacité et d'usage qui dépendent des capitaux sociaux, financiers et humain, alors qu'il affecte négativement les deux autres composantes qui dépendent des capitaux naturels et des ressources en eau. Or, la définition concrète de ces capitaux est délicate. D'ailleurs, Sullivan et al. (2002) liste les capitaux préalablement à la présentation du graphique, et dans cette liste ce qui apparaît en légende de la Figure 1 comme « ressources en eau » n'est pas inclus. En outre, il est notable que les capitaux dits naturels et financiers se répètent dans différentes composantes ; et il est aussi difficile de distinguer les capitaux dits humains des capitaux sociaux. Enfin à ce jour, le concept même de Développement Durable, et l'orientation écologique des politiques dites durables viennent à impacter positivement les capitaux naturels (United Nations, 1998, 2017). C'est pourquoi le postulat établi par Sullivan et al. (2002) représente en réalité un défi épistémologique important. Cela se retrouve d'ailleurs dans le fait que la plupart des auteurs définissent une partie des composantes de l'IPE en fonction des indicateurs ou des variables qu'elles intègrent (Tableau 4).

|                                      | (Abraham et al., 2002)  | (Sullivan et al., 2003)  | (Rentería et Pérez, 2010)   | (Li et al., 2011)  |
|--------------------------------------|---|--|---|--|
| A<br>C<br>C<br>E<br>S                | « Niveau d'accès à l'eau pour l'usage humain, mais non seulement la <b>quantité</b> , mais aussi la <b>distance à une source d'eau</b> sûre, et la <b>temporalité</b> de collecte domestique de l'eau et d'autres facteurs significatifs. L'accès fait référence à l'usage d'une eau apte à la consommation humaine, domestique, agricole et industrielle » | « Accès à l'eau pour l' <b>usage humain</b> , en incluant la <b>distance</b> à une source d'eau sûre, le <b>temps</b> nécessaire à sa collecte par ménage et d'autres facteurs significatifs. Accès inclut aussi l'eau utilisée pour <b>l'irrigation des cultures</b> et les usages industriels »                                | « Etendue de l' <b>accès à l'eau</b> pour la consommation humaine, considère les besoins basiques en <b>eau potable</b> et la disponibilité pour <b>cultiver les aliments</b> » | « Mesure à quel point la population est concrètement approvisionnée en eau, en incluant les <b>usages domestiques</b> et <b>l'irrigation</b> » |
| C<br>A<br>P<br>A<br>C<br>I<br>T<br>E | « Pertinence de la capacité de la population à gérer l'eau. La capacité est interprétée dans le sens des <b>revenus</b> et des <b>investissements</b> réalisés ainsi que de leur efficacité »   | « Pertinence de la capacité de la population à gérer l'eau. La capacité est interprétée dans le sens des <b>revenus</b> permettant d'améliorer ses conditions d'accès à l'eau, à <b>l'éducation</b> et à la <b>santé</b> , ce qui va de pair avec le revenu et indique une capacité à garantir et gérer les ressources en eau. » | « Gestion effective de l'eau »  | « Capacité à gérer les ressources en eau, basée sur <b>l'éducation</b> , la <b>santé</b> et l'accès à des <b>ressources économiques</b> »      |
| U<br>S<br>A<br>G<br>E                | « Les formes des <b>usages</b> dans laquelle l'eau est utilisé à diverses fins, cela comprend les <b>usages domestiques, agricoles, l'élevage et l'industrie</b> »  | « Différents usages de l'eau, incluant les usages domestiques, agricoles et industriels »  | « L'usage donné aux ressources hydriques disposées pour l'usage industriel, domestique et agricole »  | « L'usage qui est fait de l'eau »  |

|   |  |   |   |   |
|---|--|---|---|---|
| R<br>E<br>S<br>S<br>O<br>U<br>R<br>C<br>E                     | « Disponibilité physique de l'eau superficielle et souterraine, en tenant compte de la <b>variabilité</b> et de la <b>qualité de la ressource</b> ainsi que de sa <b>quantité totale</b> » | « Disponibilité physique de l'eau superficielle et souterraine, en tenant compte de la variabilité et de la qualité de la ressource ainsi que de sa quantité totale » | « Quantité d'eau disponible, intègre des <b>données de population</b> et de <b>flux d'eau</b> »   | « A quel point l'eau est disponible, en tenant compte des <b>variations saisonnières</b> et <b>interannuelles</b> » |
| E<br>N<br>V<br>I<br>R<br>O<br>N<br>N<br>E<br>M<br>E<br>N<br>T | « Evaluation de l'intégrité environnementale qui met en relation l'eau avec l'usage de ressources naturelles, la <b>productivité agricoles</b> , et la <b>dégradation de la terre</b> »    | « Evaluation de <b>l'intégrité environnementale</b> associée à l'eau aux bénéfices écosystémiques, et aux services des habitats aquatiques sur le territoire »        | « Impact environnemental, pour assurer <b>l'intégrité écologique</b> de l'eau à long terme [...] montre les <b>réserves</b> et <b>l'administration de l'eau</b> » | « Impact environnemental de la gestion de l'eau »   |

Tableau 4 : Différentes définitions des composantes de l'IPE à travers la littérature



En outre, le nombre et la nature des composantes suscitent des discussions (Feitelson et Chenoweth, 2002). Certains auteurs, qui s'intéressent particulièrement aux politiques nationales et aux problématiques d'équité sociale affirment ainsi que la composante d'environnement n'est pas pertinente pour l'évaluation de la pauvreté en eau (Feitelson et Chenoweth, 2002 ; Fenwick, 2010). Cette affirmation va à l'encontre des études menées par Cho et al. (2010), et contredit la présentation qui a été faite de l'IPE et dans laquelle la composante d'environnement, tout comme la composante d'usage, caractérise justement l'étude de la pauvreté en eau et la singularise par rapport à d'autres méthodes d'évaluation de la pénurie en eau... Néanmoins, la même affirmation est certaine si la pauvreté en eau est définie uniquement à partir de facteurs sociosystémiques. Autrement dit, dans ce cas, le débat se situe au niveau conceptuel et non pas au niveau méthodologique : à ce titre il est donc d'autant plus fondamental. De la même façon, d'autres auteurs proposent d'exclure la composante d'usage pour simplifier la méthodologie (Cho et al., 2010 ; Giné et Pérez-Fouget, 2008 ; Giné, 2009). Mais en parallèle d'autres auteurs considèrent qu'il s'agit de l'une des principales composantes de l'IPE : d'après Fenwick (2010) ; Heidecke (2006) elle est caractéristique de l'indice. Il est aussi notable que le même débat existe en ce qui concerne la composante de ressource (Chenoweth, 2008 ; Parga et al., 2006).

Ces discussions essentielles suivent l'IPE depuis son origine (Lawrence et al., 2003), pourtant les propositions qui en sont nées ne se sont que rarement reprises (Jemmali, 2013 ; Van Der Vyver, 2013b, 2013a). Leur persistance pousse à poursuivre la réflexion pour étudier les consensus concernant les indicateurs employés dans les calculs.

- Interrogations informelles sur la sélection et la normalisation des indicateurs

Contrairement aux débats qui viennent d'être mentionnés à propos des composantes de l'IPE, les opérations de normalisation ainsi que le choix des indicateurs employés pour son calcul ne sont pas discutés de manière formelle dans l'actualité. En dehors de l'approche théorique initiale (Sullivan, 2002), les interrogations associées à ces étapes méthodologiques prennent la forme de différentes démarches relativement isolées. Quelques consensus existent en ce qui concerne la normalisation, alors que la sélection des indicateurs est peu uniformisée.

La normalisation de l'IPE est traditionnellement opérée à travers une approche dite Min-Max (Section 1.2.2 et 1.3.2). Celle-ci emploie en théorie les maxima et les minima de l'échantillon collecté, afin de classer les données entre elles. Elle est donc « *data specific* »<sup>63</sup> : c'est à dire qu'elle n'est valable que pour un seul échantillon de données. Dès lors, elle ne peut pas être employée dans le cadre de plusieurs études. Cela limite les possibilités de comparaisons entre les différents calculs de l'IPE (Fenwick, 2010 ; Mlote et al., 2002). Dans le cadre de la construction des indices, qui ont par définition une vocation comparatrice (Section 1.1.3), cette restriction constitue une limite majeure. C'est pourquoi l'approche min-max n'est pas toujours strictement appliquée pour l'IPE (Gong et al., 2017 ; Maheswari et al., 2017 ; Manandhar et al., 2012). En l'occurrence, deux adaptations se distinguent particulièrement en utilisant des seuils partiellement réutilisables.

Manandhar et al. (2012) valorisent les indicateurs qui sont « *self-normalized* ».<sup>64</sup> C'est le cas des pourcentages, et ainsi de la plupart des taux comme celui de la couverture des services en eau courante et en drains. De fait, ces indicateurs sont échelonnés de 0 à 100, et l'une ou l'autre de ces extrémités correspond aux conditions optimales de l'indicateur, tandis que l'autre correspond à ses conditions minimales<sup>65</sup>. Manandhar et al. (2012) appliquent aux autres indicateurs des opérations de normalisation de telle sorte à obtenir des résultats compris entre 0 et 100, qui sont donc compatibles avec l'échelle des pourcentages auto-normalisés. Ces indicateurs sont normalisés à travers l'approche Min-Max en utilisant, à une exception près, les maxima et minima de l'échantillon. Pour l'indicateur d'usage de l'eau, l'équation 1 est appliquée mais en employant des seuils définis à partir de la littérature spécialisée. Cette démarche est adoptée dans plusieurs études de l'IPE (Jemmali et Matoussi, 2012), en employant des seuils plus ou moins uniformes, qui sont tous issus déduits de l'analyse de Howard et Bartram (2003) (Section 2.4.1).

Pour leur part, Maheswari et al. (2017) n'utilisent pas l'approche Min-Max. A la place les auteurs définissent différents seuils dans une démarche qui rappelle celle des courbes d'aptitudes employées dans la méthode « *FUZZY* » (Section 1.4.2). Même si les seuils ainsi déterminés sont discutables, ils présentent l'avantage de pouvoir être appliqués dans le cadre d'autres études qui pourraient être comparées avec celle de Maheswari et al. (2017). Mais cette possibilité est limitée par un aspect

---

<sup>63</sup> « exclusivement associées aux données »

<sup>64</sup> « auto-normalisés ».

<sup>65</sup> Seul reste à définir laquelle des deux est optimale et, le cas échéant, une simple opération de soustraction permet d'inverser l'échelonnement et d'aboutir à une classification dont les conditions iraient croissante de 0 vers 100.

méthodologique important : pour réemployer les seuils de Maheswari et al. (2017), il faudrait que les indicateurs soient construits exactement de la même façon. Or, à l'heure actuelle, l'uniformisation des indicateurs employés pour construire l'IPE est limitée.

Si la normalisation des indicateurs est peu soumise à discussions, la sélection des indicateurs l'est encore moins. Quelques réflexions relativement isolées adoptent diverses perspectives. Ainsi, Parga et al. (2006) et Álvarez et al. (2013) détaillent la sélection des indicateurs, et proposent à cette occasion des pondérations spécifiques. Celles-ci sont élaborées à partir de considérations statistiques (López Álvarez et al., 2013) ou théoriques : par exemple il s'agit de pondérer les chiffres obtenus pour les données d'eaux-souterraines de la composante de ressource de manière moins importantes que celles des eaux de surface qui sont plus facilement disponibles et rechargeables (Parga et al., 2006). La démarche de Cullis et Gorgens (2006) est différente puisqu'elle réside dans une simplification de l'IPE, à travers la réduction du nombre d'indicateurs : il construit ainsi chaque composante à partir d'un seul indicateur. Dans ce cadre, la sélection des indicateurs est discutée sur la base du postulat de la simplification, par conséquent, ses apports restent limités lorsque la profusion des indicateurs de l'IPE est conservée. Pour leur part, Abraham et al. (2002) et Huang et al. (2017) mènent des réflexions concernant l'adaptation des indicateurs aux conjonctures structurelles des pays où ils l'appliquent, respectivement l'Argentine et la Chine. Enfin – comme il a déjà été signalé – Wilk et Jonsson (2013) et Fenwick (2010) développent des réflexions sur l'usage des données publiques en comparant les résultats obtenus avec deux types d'indicateurs. En l'occurrence, les auteurs calculent deux IPE, l'un à partir de données publiques, et l'autre où les indicateurs ont été sélectionnés dans une démarche participative au sein de la communauté considérée.

Ensembles, ces démarches insistent sur le fait que le choix des indicateurs dépend du contexte de calcul de l'IPE (Section 1.2.3). Néanmoins les stratégies adoptées ne sont pas confrontées dans des discussions formelles, ni dans les études qui les ont développées, ni en dehors. La formalisation de ce débat relatif aux *focales analytiques* de l'IPE (Section 1.3.3) est en grande partie freinée par la question de l'accès aux données.

- Des débats avortés à cause de la disponibilité des données (et des enjeux associés)

Différents indicateurs sont employés selon les pays d'études, mais aussi selon les échelles d'application de l'IPE (Section 1.2.3). Dans ce contexte, en calculant deux IPE (un à partir des données publiques, et l'autre à partir de données de terrain), Wilk et Jonsson (2013) et Fenwick (2010) suggèrent que l'utilisation de données publiques oriente les résultats des diagnostics.

De fait, l'IPE est considéré comme un outil d'intégration des données publiques, surtout aux échelles régionales (Section 1.2.3). Pour beaucoup d'auteurs, l'utilisation des bases de données publiées par les autorités constitue un avantage étant donné qu'elle permet de calculer l'IPE facilement et à bas prix (Cullis et Gorgens, 2006 ; Van Der Vyver et Jordaan, 2011 ; Wilk et Jonsson, 2013). Cependant, la visée politique de ces données ne doit pas être oubliée. En particulier dans un contexte où le développement est un enjeu de premier plan, les données produites par les autorités publiques peuvent difficilement être considérées comme neutres du point de vue des diagnostics de développement (Theys, 2003, 2005). Sullivan et al. (2003) avaient signalé ce problème dans le cadre des études locales et noté le besoin de faire avancer la réflexion et de travailler avec les autorités à ce sujet... Mais à ce jour, le problème reste entier, et les répercussions sont lourdes (Anju et al., 2017). D'une part, l'utilisation de différentes données, et donc de différents indicateurs freine les consensus concernant l'indice, puisqu'elles réduisent les possibilités de comparaisons (Section 1.3.2). Mais d'un autre côté, les carences associées aux données interrogent la pertinence des diagnostics réalisés avec l'IPE.

Les données publiques sont parfois critiquées car elles sont incomplètes ou peu fiables (CONAGUA, 2015a ; Frenken, 2005 ; Jimenez, 2008). Les manques de données constituent une limite importante pour leur exploitation scientifique, mais plus encore les limites de fiabilité. Dans le cadre de l'IPE, Wilk et Jonsson (2013) et Sullivan et al. (2003), questionne l'objectivité des données publiques. Wilk et Jonsson (2013) exposent ainsi que les indicateurs employés par les différents acteurs de la gestion de l'eau ne focalisent pas les mêmes aspects de la pauvreté en eau. En conclusion les données publiées par les autorités insistent sur certains aspects et en écartent d'autres, qui peuvent être considérés comme significatifs (Fenwick, 2010). Le cas des données environnementales permet d'illustrer comment cette restriction impacte les calculs de l'IPE. Pour diagnostiquer la préservation environnementale plusieurs tendances existent (Section 1.3.2) : il s'agit soit de données environnementales, soit de données administratives concernant l'existence de territoires protégés, ou plus généralement d'attentions écologiques (Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et al., 2003). Or, ces deux types de données ne sont pas équivalents. Les données concernant l'accès à l'information, en l'occurrence aux technologies d'internet

et de communication, peuvent indiquer une forme de capacité, mais ne disent rien de l'état réel de préservation de l'environnement.

Face à ces limites, les études de l'IPE tendent à valoriser au maximum les données publiques et à supprimer les indicateurs lorsque les données ne sont pas disponibles (Anju et al., 2017 ; Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et Meigh, 2005). Mais dans une démarche à plus long terme, Sullivan et al. (2003) évoquent aussi la possibilité de négocier avec les autorités afin de développer des collectes standardisées. En pratique néanmoins, la négociation au long terme est lente et ses bénéfices n'impactent pas l'IPE de manière notable à ce jour. Cela mène Sullivan et al. (2006) à substituer explicitement des indicateurs d'environnement.

Le manque d'uniformisation des données affecte l'IPE en termes de répliquabilité, et par extension il réduit les possibilités de comparaison des études. Ce problème est d'autant plus marquant qu'il intervient dans le cadre d'un indice qui transcende les limites disciplinaires. Ces deux caractéristiques réduisent conjointement les consensus existant sur la construction des composantes de l'IPE, de telle sorte qu'elles finissent par interroger son interdisciplinarité.

### 1.3.3 *Débats concernant la construction des composantes : quelles intégrations du développement et des facteurs hydrologiques et environnementaux dans l'IPE ?*

Les sections précédentes signalent que si toutes les applications de l'IPE définissent la pauvreté en eau en associant plusieurs disciplines, et l'évalue donc à travers différentes composantes, concrètement leur élaboration varie selon les études (Abraham et al., 2002 ; Li et al., 2011 ; Rentería et Pérez, 2010; Sullivan, 2002 ; Wilk et Jonsson, 2013). Ainsi, les auteurs s'accordent majoritairement sur le fait qu'il faut évaluer l'intégrité de l'environnementale dans la composante d'environnement, mais les indicateurs employés pour cela peuvent changer du tout au tout. Cela témoigne des difficultés qui existent (encore à ce jour) pour la conceptualisation des *focales analytiques*<sup>66</sup> d'un outil novateur tel que l'IPE (Sullivan et al., 2002).

---

<sup>66</sup> Ce terme, emprunté à Vollmer et al. (2016), est défini dans la section 1.1.2.

Néanmoins, ces questions ne touchent pas également toutes les composantes de l'IPE : les trois qui sont le plus mises en question par la littérature spécialisée sont celles de capacité, d'environnement et de ressource. La présente section présente les alternatives de construction et les débats concernant ces composantes, et souligne les interrogations portant finalement la place accordée aux problématiques associées à l'hydrosystème, à l'écosystème et au développement.

- Diversité des indicateurs inclus dans la composante 'Environnement '

Heidecke (2006) signale que la composante d'environnement est particulièrement difficile à élaborer. Outre la difficulté épistémologique déjà mentionnée, il faut noter à ce sujet que les données disponibles sont relativement peu nombreuses, et varient tout particulièrement d'un territoire à l'autre. Dans ce domaine en effet, les connaissances actuelles sont en voie d'expansion, mais les méthodes de diagnostic sont particulièrement coûteuses et chronophages, et ne sont souvent menées qu'à des échelles localisées (Centofanti et al., 2008 ; Finizio et Villa, 2002).

En conséquence les indicateurs de cette composante sont tout particulièrement hétéroclites (Tableau 5). En plus des diverses mesures de la qualité de la ressource (abordées dans le point suivant), ils intègrent des mesures relatives à la couverture des sols, à leur érosion, aux capacités d'accès à l'information, aux mesures de protection ou à leurs résultats – à savoir une évaluation de la biodiversité, ou de l'exploitation des aquifères –. La grande variété du lexique employé pour décrire les indicateurs rend particulièrement difficile la définition de lignes directrices.

Après analyse et en accord avec Garriga et Foguet (2010b), on peut néanmoins noter qu'une grande majorité d'études intègrent des indicateurs relatifs à la préservation environnementale. Celle-ci est essentiellement exprimée en fonction de la régulation ou gestion environnementale, de l'existence d'aires protégées, ou de la couverture arborée du territoire (Castelazo et al., 2007 ; Heidecke, 2006 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Li et al., 2011 ; López et al., 2013 ; Manandhar et al., 2012 ; Parga et al., 2006). Dans le corpus d'études considérées, plusieurs études ajoutent à cette première mesure, un indicateur de biodiversité. Parmi elles, certaines ajoutent encore un indicateur d'érosion (Parga et al., 2006 ; Rentería et Pérez, 2010), alors que les autres ajoutent un indicateur d'accès à l'information (Castelazo et al., 2007 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003).

|                              | Qualité Chimique | Polluant          |              |           | Biodiversité | Régulation ou information | Sols et végétation |             |                    |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------|-----------|--------------|---------------------------|--------------------|-------------|--------------------|
|                              |                  | Phytoparasitaires | Fertilisants | épuration |              |                           | Erosion            | Dégradation | Changement d'usage |
| (Cullis et Gorgens, 2006)    |                  |                   |              |           |              |                           | +                  | +           |                    |
| (Parga et al., 2006)         |                  |                   |              |           | *            | *                         | *                  |             |                    |
| (Lawrence et al., 2003)      | *                | +                 | +            |           | *            | *                         |                    |             |                    |
| (Castelazo et al., 2007)     | *                | +                 | +            |           | *            | *                         |                    |             |                    |
| (Jemmali et Matoussi, 2012)  | *                | +                 | +            |           | *            | *                         |                    |             |                    |
| (Heidecke, 2006)             |                  | *                 | *            |           |              | +                         | *                  |             | +                  |
| (Rentería et Pérez, 2010)    | *                |                   |              | *         | /            |                           | /                  | /           |                    |
| (Fenwick, 2010)              | /                |                   |              | /         |              |                           | +                  | +/          |                    |
| (Li et al., 2011)            | *                |                   |              | /         | /            |                           | *                  |             | *                  |
| (Manandhar et al., 2012)     |                  |                   | *            |           |              |                           |                    | *           |                    |
| (Garriga et Foguet, 2010a)   | +                |                   |              |           |              |                           | +                  | /           |                    |
| (López Álvarez et al., 2013) | +                |                   |              |           |              | *                         |                    |             |                    |

+ : ils sont associés dans un seul indice

\* : présents tels que

/ : présents sous une autre forme

**Tableau 5 : Principales données de qualité de l'eau et de préservation environnementale employées dans la littérature spécialisée sur l'IPE.**

Encore faut-il noter que cette synthèse regroupe sous la même appellation des indicateurs qui peuvent être élaborés de différentes manières. En effet, la méthodologie employée pour l'élaboration des indicateurs n'est pas toujours explicitement développée, et lorsqu'elle l'est, il est rare que terminologie et méthode soient constantes dans les différentes études concernées. Il est par exemple parfois fait mention de dégradation des sols, ou d'une caractérisation de la couverture arborée (Cullis et O'Regan, 2004 ; Manandhar et al., 2012). En somme, la composante d'environnement pose de nombreuses questions tant du point de vue conceptuel que de celui de la méthode.

- Des diagnostics hydrologiques qui posent question

La construction du diagnostic hydrologique pose elle aussi plusieurs problèmes. Tout d'abord, l'intégration des indicateurs relatifs à la qualité de l'eau ne fait pas consensus :

- ✓ certains auteurs les concentrent tous dans la composante d'environnement (Heidecke, 2006 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Manandhar et al., 2012 ; Rentería et Pérez, 2010) ;
- ✓ alors que d'autres les répartissent entre les deux composantes de ressource et d'environnement (Castelazo et al., 2007 ; Fenwick, 2010 ; Li et al., 2011 ; Parga et al., 2006) ;
- ✓ enfin, certains proposent même de construire une autre composante appelée qualité pour les intégrer, proposition qui a été reprise dans deux études réalisées au Mexique (López et al., 2013 ; Pineda, 2016). Cependant cela ne change pas le type de données ou d'indicateurs intégrés dans l'IPE, il s'agit seulement d'une alternative d'intégration.

En outre, la littérature spécialisée souligne que les données hydrologiques notamment sont « *either absent or unreliable* »<sup>67</sup> (Fenwick, 2010). Comme dans le cas de la composante d'environnement, cela peut être attribué à différentes raisons : la complexité des mécanismes considérées, l'extension progressive mais couteuse et par conséquent encore notablement parcellaire des bases de données à ce sujet. Dès lors les indicateurs correspondant sont aussi particulièrement hétéroclites. C'est particulièrement le cas pour l'analyse qualitative de la ressource. Comme l'indique le Tableau 5, les données de qualité de l'eau sont quant à elles réparties dans trois types d'indicateurs. Suivant la

---

<sup>67</sup> « Soit absente soit non-représentatives »



proposition de Lawrence et al. (2003), les indicateurs de *Water quality*<sup>68</sup> sont élaborés à partir de diverses analyses physiques et chimiques de la ressource, tandis que ceux de *Water stress*<sup>69</sup> sont élaborés en évaluant les quantités de fertilisants ou de pesticides employés dans l'agriculture, et parfois aussi les pollutions d'origines industrielles. Enfin, quelques études incluent aussi des données relatives au traitement des eaux usées. Mais rares sont d'ailleurs les études qui détaillent la construction des indicateurs. Et aucun consensus ne se dégage, même globalement.

Pour finir, il faut signaler que les indicateurs relatifs à la quantité de la ressource ne font pas plus consensus. Ainsi, dans certains cas, la composante est exclusivement élaborée à partir d'indicateurs de disponibilité de l'eau exprimés en m<sup>3</sup>/personne (Fenwick, 2010 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et al., 2006). Mais dans d'autres cas, il s'agit exclusivement d'indicateurs de volumes qui sont donc exprimés en m<sup>3</sup>/an (Anju, et al., 2017 ; Castelazo et al., 2007 ; Heidecke, 2006 ; Parga et al., 2006 ; Rentería et Pérez, 2010) : deux d'entre eux incluent des données d'usages alors que les deux autres n'associent que des données relatives à l'hydrosystème. Enfin, quelques études combinent ces alternatives en associant des indicateurs de disponibilité et des indicateurs de volume (Gong et al., 2017 ; Li et al., 2011 ; Maheswari et al., 2017 ; Manandhar et al., 2012). A ce sujet, il faut néanmoins noter qu'un glissement progressif s'opère vers l'intégration d'indicateurs de volumes : alors qu'ils n'étaient que rarement inclus dans les premières études sur l'IPE, rares sont les études les plus récentes qui ne les incluent pas.

Ces différentes alternatives sont intéressantes à souligner, et importantes à discuter. En effet, à travers le choix des indicateurs et des données, c'est finalement l'intégration des problématiques de développement et d'écologie qui sont en jeu.

- Construction de la composante de capacité et corrélations avec l'IDH

---

<sup>68</sup> « Qualité de l'eau » : le terme anglais est présentement conservé afin de distinguer le concept général de qualité de l'eau, et le nom de ces indicateurs spécifiques.

<sup>69</sup> « Stress en eau » : le terme anglais est présentement conservé afin de distinguer le concept de Stress hydrologique traditionnellement associé à l'indice de Falkenmark (1989), et le nom de ces indicateurs spécifiques.

Aux échelles régionales, de nombreuses analyses statistiques critiquent les synergies internes de l'indice et interrogent la place octroyée au développement dans les calculs. Ainsi, il a été démontré que la composante 'Capacité' présente une forte corrélation d'une part avec la composante 'Accès', et d'autre part avec le résultat final de l'IPE (Cullis et Gorgens, 2006 ; Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Komnencic et al., 2009 ; Lawrence et al., 2003). Autrement dit, l'indice montre des redondances qui sont par définition problématiques en termes de pertinence. Elles le sont d'ailleurs d'autant plus que cette composante correspond à un diagnostic multisectoriel de développement élaboré à travers la méthode l'Indice de Développement Humain, dit « IDH » (Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et al., 2003). Or cet autre indice, même s'il est devenu une référence, est néanmoins critiqué en raison de ses redondances internes ainsi que de sa forte corrélation avec l'évaluation du Produit Intérieur Brut, le PIB. Dès lors, si l'IPE affiche de fortes corrélations avec la composante de capacité, il est par définition fortement corrélé à l>IDH d'une part, et au PIB d'autre part. Et les critiques appliquées à l>IDH lui sont aussi applicables (Lawrence et al., 2003).

D'ailleurs ces corrélations mettent en question la pertinence de l'ensemble de l'IPE (Fenwick, 2010 ; Giné et Pérez-Fouget, 2008 ; Lawrence et al., 2003). Comme le disent Lawrence et al. (2003) si le diagnostic obtenu avec la méthodologie novatrice de l'IPE peut majoritairement être expliqué par le calcul traditionnel de l>IDH, alors pourquoi calculer l'IPE ? Déjà diffusé tant au sein de la communauté scientifique que dans le cadre de la prise de décision, l>IDH est en outre plus simple que l'IPE : à ce titre si les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont comparables, l>IDH paraît plus intéressant que l'IPE. Cette question est d'autant plus importante qu'elle souligne une forme d'échec de la méthodologie de l'IPE. En effet, théoriquement il intègre des dimensions environnementales qui n'ont pas leur place dans l>IDH (Lawrence et al., 2003). Par conséquent ses résultats devraient être différents de ceux de l>IDH. Cela indique donc que malgré l'intégration de différentes composantes, l'IPE est plus sensible au développement qu'aux facteurs environnementaux et hydrologiques. Autrement dit, son objectif interdisciplinaire ne semble pas avoir été atteint. Face à ce constat, certains auteurs signalent que cet objectif est discutable car : « *the idea that global and local water shortages are to blame for the fact that over a billion people lack water supplies turns out to be a myth* »<sup>70</sup> (Cairncross (2003) cité par

---

<sup>70</sup> « L'idée que les insuffisances en eau, globales et locales, sont responsables du fait que de billion de personnes manquent de ressource est devenu un mythe »

Fenwick (2010, p. 209)). Mais ces considérations détournent l'IPE de sa vocation originelle, laquelle a été présentée dans les Sections 1.1.3 et 1.2.1, mais aussi dans d'autres études comme un atout majeur (Molle et Mollinga, 2003a ; Sullivan et al., 2006).

En somme l'interdisciplinarité des diagnostics de l'IPE est mise en question dans des débats formels concernant la composante de capacité, mais aussi dans des interrogations informelles portant sur les composantes d'environnement et de ressource. A cela, vient s'ajouter une autre limite, relative à la simplification des résultats et conséquemment à leur représentativité territoriale. Celle-ci apparaît elle aussi à travers des débats qui sont aussi plus ou moins formalisés, et qui interrogent aussi la visibilité des problématiques environnementales, mais aussi celle des espaces agricoles et ruraux.

Ces considérations se transcrivent finalement en enjeux méthodologiques portant sur la construction et la normalisation des indices, la méthode d'agrégation et la définition des unités de calcul. Certains traitements cartographiques, autorisés par les Systèmes d'Information Géographiques (SIG), permettent de valoriser différentes bases de données ainsi que différentes échelles dans des représentations synthétiques. La section suivante précise comment ces outils sont employés pour calculer l'IPE et construire un diagnostic de vulnérabilité au Mexique.

#### **1.4 Calculer un IPE-SIG et le compléter par une analyse de discours dans le cadre d'un diagnostic de vulnérabilité**

Les sections précédentes ont présenté l'IPE et plusieurs fois signalé que les choix méthodologiques diffèrent selon l'échelle et les objectifs considérés (Section 1.2.3 et 1.3). En l'occurrence, il est calculé pour construire un diagnostic interdisciplinaire de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau afin d'aider la prise de décision (Section 1.1). Dans ce cadre, l'IPE est un outil plein de potentiel, mais les interrogations portant sur l'interdisciplinarité et sur la représentativité territoriale des résultats (en ce qui concerne notamment les pauvretés en eau des milieux agricoles et ruraux) prennent une importance fondamentale. En outre, l'IPE présente certaines limites en ce qui concerne les diagnostics de vulnérabilité sociale.

Cette section présente le périmètre de l'étude ainsi que les sous-objectifs considérés pour calculer et compléter l'indice dans l'Etat de Chihuahua, au Mexique : quatre d'entre eux impliquent d'adapter la méthodologie de l'IPE grâce à des outils cartographiques, tandis que le dernier attire l'attention sur l'analyse des discours à travers une approche relationnelle.

#### 1.4.1 *Adapter l'IPE pour étudier la vulnérabilité associée aux pénuries en eau de manière interdisciplinaire au Mexique*

Pour l'IPE comme pour tout calcul d'indice, les choix méthodologiques dépendent de ce que l'étude cherche à démontrer (Garriga et Foguet, 2010a ; Li et al., 2011). En l'occurrence il est calculé pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité interdisciplinaire qui puisse servir à la prise de décision au Mexique. Cette section passe en revue les études de l'IPE menées au Mexique ainsi que les attentes concernant les diagnostics de vulnérabilité pour situer le calcul présentement proposé. La confrontation de ces deux littératures permet de définir les sous-objectifs de recherche concernant le diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau à travers l'utilisation de l'IPE au Mexique.

- Antécédents des calculs de l'IPE et des études quantitatives interdisciplinaires de vulnérabilité au Mexique : Deux traditions de diagnostics parallèles

Il existe un intérêt à la fois scientifique et politique pour le calcul de l'IPE au Mexique, comme l'indique le fait que son calcul y ait été entrepris plusieurs fois :

- ✓ Castelazo et al. (2007), l'ont ainsi adapté sous la forme d'un IVC dans la municipalité de Juarez située dans l'Etat de Chihuahua au Nord du pays (Section 1.1.3) ;
- ✓ Rentería et Pérez (2010), l'ont calculé l'IPE au niveau des Etats, en obtenant un résultat qui représente peu les variations de disponibilité physique de la ressource ;
- ✓ Fenwick (2010) l'a co-construit localement et l'a calculé en parallèle au niveau des états ;
- ✓ Álvarez et al. (2013) l'a appliqué à dans la vallée de San Luis de Potosi, située dans un contexte semi-aride ;

- ✓ Pineda Chacon (2015) l'a appliqué dans le cadre d'une réflexion sur la contamination de la ressource dans quelques municipalités de l'Etat de Chihuahua (comme Castelazo et al., 2007).

Au vu de ces démarches, les attentes concernant l'IPE semblent fortes, mais aussi variées : différences d'échelles mais aussi d'objet d'études. Cette diversité rappelle ce qui avait été mentionné plus généralement sur les applications de l'IPE (Section 1.2.3). En revanche, en ce qui concerne les études pluridisciplinaires portant sur la vulnérabilité associée aux dégradations hydriques au Mexique, le document *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*<sup>71</sup> (Arreguin, 2015) fait figure d'autorité. Il est constitué de six chapitres qui recensent des cartes portant sur :

- ✓ L'indice de vulnérabilité sociale par municipalité ;
- ✓ Des projections de changement de température et de pluviométrie ;
- ✓ L'indice de risque municipal associé aux pluies et aux cyclones ;
- ✓ La vulnérabilité hydrologique globale ;
- ✓ La vulnérabilité de l'agriculture irriguée au changement climatique ;
- ✓ L'indice de risque de qualité de l'eau, calculé à l'échelle « estatal »<sup>72</sup>.

Plusieurs de ces chapitres associent des analyses d'ordre statistiques et cartographiques. La cartographie sert notamment à aborder les dynamiques climatiques parmi lesquelles l'aridité mais aussi le changement climatique tiennent des places importantes. En outre, tous les chapitres synthétisent les résultats des analyses sous forme de cartes : la majorité de ces cartes (comme celle de la vulnérabilité de l'agriculture irriguée au changement climatique) sont le fruit d'approches multidimensionnelles.

Ces deux champs d'études se recoupent à plusieurs niveaux, puisqu'ils sont tous deux interdisciplinaires et qu'ils s'intéressent autant aux dégradations quantitatives et qualitatives de la ressource qu'aux capacités de la société à faire face à ces dégradations (Section 1.1). Mais des différences importantes apparaissent entre eux ; leur observation sert à définir le périmètre de la présente étude.

A l'image de ce qui a été noté pour la littérature spécialisée concernant l'indice (Section 1.2.3), l'IPE a été calculé au Mexique à deux types d'échelles : celle des états sur l'ensemble du pays, et

---

<sup>71</sup> « Atlas de vulnérabilité hydrologique au Mexique face au changement climatique »

<sup>72</sup> Comme il a été signalé dans l'introduction, le Mexique est un pays d'Etats fédérés, lesquels prennent le nom de « *Estados* » : l'adjectif *estatal* se réfère à des caractéristiques propres à ce niveau de gestion.

ponctuellement à l'échelle d'une vallée, ou de quelques communautés ou municipalités. Il faut noter que lorsqu'il est calculé localement (Castelazo et al., 2007 ; Fenwick, 2010 ; López et al., 2013), les études de l'IPE s'intéressent particulièrement à la pauvreté en eau des territoires semi-arides du nord du Mexique, où la disponibilité de la ressource et sa gestion posent des questions spécifiques (cf. introduction). Mais malgré ce point commun, l'uniformisation de la méthode et donc sa portée comparative sont restreintes : comme dans le reste des études de l'IPE, les indicateurs et la normalisation étant spécifiques aux territoires et aux thématiques considérés (Section 1.3.2). De la même façon, les calculs menés à l'échelle des états, présentent peu d'uniformisation malgré le fait qu'elles utilisent des données publiques (Fenwick, 2010 ; Rentería et Pérez, 2010).

Pour l'Atlas de vulnérabilité, les échelles d'analyse varient aussi depuis l'échelle municipale, jusqu'à celle des états en passant entre autres par celles des régions hydro-administratives (Arreguin, 2015). Néanmoins l'échelle municipale s'impose comme une échelle de référence puisque toutes les analyses viennent à la considérer, exception faite des données de qualité (dont le statut particulier est commenté dans la section 2.2.3 et 3.4). En tout cas, les différentes facettes de l'étude sont présentées sous des formes cartographiques qui couvrent systématiquement tout le territoire mexicain et reposent sur l'utilisation de données publiques. L'Atlas s'inscrit donc dans le cadre d'une collaboration indirecte avec les autorités publiques, pour systématiser le diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau. Le résultat prend un caractère interdisciplinaire et multi-scalaire, mais les différentes dimensions de la vulnérabilité sont étudiées séparément. Contrairement aux diagnostics de l'IPE, l'Atlas ne produit pas d'analyse synthétique qui associerait les différentes dimensions de la vulnérabilité. Dans ce contexte, l'IPE semble intéressant pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité interdisciplinaire synthétique, mais cette démarche requiert d'adopter des alternatives méthodologiques spécifiques en ce qui concerne l'uniformisation de la méthode, mais pas seulement.

En effet, il faut noter que les calculs de l'IPE au Mexique font peu d'emphase sur la caractéristique semi-aride du territoire, alors que l'Atlas insiste tout particulièrement sur cette question. Les résultats obtenus par Rentería et Pérez (2010), comme ceux de Fenwick (2010), dénotent un très faible impact des facteurs hydrologiques de pauvreté en eau. En effet, ils attribuent aux états du nord aride du Mexique, à Chihuahua notamment, les IPE les plus élevés (Section 1.3 et Cartes 1 et 2) : autrement dit, c'est là où le contexte climatique est le moins favorable que la pauvreté en eau est diagnostiquée comme étant la moins problématique. Le contenu de ces résultats n'est pas exceptionnel au sein des études de l'IPE ; au

contraire, il s'inscrit au cœur des débats portant conjointement sur l'interdisciplinarité de l'indice et sur la place accordée au développement (et aux problématiques hydro-environnementales) dans ses résultats (Section 1.3). Dans ce contexte, la différence mentionnée entre l'Atlas de vulnérabilité et les études de l'IPE au Mexique est d'autant plus notable. De manière similaire, il faut remarquer que l'Atlas dédie un chapitre entier à l'analyse des vulnérabilités agricoles, alors que cette question est presque entièrement éludée dans les calculs mexicains de l'IPE. Autrement dit, les limites concernant la représentativité territoriale de l'IPE distingue elle aussi les deux champs d'études.

- Adapter les méthodes de calcul de l'IPE pour diagnostiquer la vulnérabilité associée à la pénurie en eau à l'échelle des municipalités au Mexique

Dans le cadre des diagnostics de la vulnérabilité, la méthodologie de calcul de l'IPE doit donc être établie de sorte à renforcer :

- ✓ son interdisciplinarité et ses *focales analytiques*<sup>73</sup>, en particulier l'intégration des problématiques hydrologiques et environnementales ;
- ✓ sa répliquabilité, au moins dans le territoire mexicain ;
- ✓ et sa représentativité territoriale, en ce qui concerne notamment les milieux agricoles.

Ces trois points se trouvent être des limites au cœur de débats plus ou moins formels sur l'indice en lui-même (Section 1.3). La méthodologie de l'IPE a donc parfois été adaptée de façon à renforcer l'un ou l'autre de ces aspects, mais les discussions restent limitées, par le manque d'uniformisation des données et de la diversité qui règne au sein des objectifs de calcul. Dans la perspective spécifique d'un diagnostic de vulnérabilité interdisciplinaire qui est présentement adoptée, ces trois points sont formellement abordés en définissant en l'occurrence quatre sous-objectifs de calculs. Comme le donne à voir ce qui suit, l'utilisation d'analyses cartographique y tient une place de premier plan.

Tout d'abord, pour étudier la vulnérabilité associée aux pénuries en eau il est non seulement intéressant d'analyser les dégradations de la ressource, mais aussi de considérer les infrastructures matérielles, sociales et économiques intervenant dans la gestion et la valorisation de la ressource (Section 1.1). Les cinq composantes de l'IPE permettent en théorie d'associer les analyses de l'écosystème, de

---

<sup>73</sup> Ce terme, emprunté à Vollmer et al. (2016), est défini dans la section 1.1.2.

l'hydrosystème et du socioécosystème et de réaliser ainsi un diagnostic de l'ensemble des facteurs qui contribuent à générer ou à réduire la vulnérabilité (Sections 1.1.3 et 1.2.1). Néanmoins, alors que trois composantes (accès, capacité et usage) étudient exclusivement le sociosystème et sont relativement peu mises en question, les deux autres (environnement et ressource) intégrant des facteurs relatifs au socioécosystème, suscitent des débats (Sections 1.3.3). La redondance de ces facteurs, qui s'explique au moins partiellement par la sélection des indicateurs de ressource et d'environnement, finit par interroger l'interdisciplinarité de l'indice.

Au Mexique, ces interrogations sont partiellement abordées dans l'étude de Fenwick (2010) qui discute l'impact prépondérant du développement humain dans l'IPE, et qui réfléchit aussi à l'impact des données publiques sur les indicateurs. Néanmoins l'auteure n'associe pas ces deux discussions. Comme Rentería et Pérez (2010), elle adapte les indicateurs proposés par Lawrence et al. (2003), et Sullivan et al. (2006) essentiellement en fonction de la disponibilité des données. Ce faisant, les deux études élaborent la composante de ressource à partir d'indicateurs administratifs tels que l'origine superficielle de l'eau utilisée (Fenwick, 2010 ; Rentería et Pérez, 2010). Au contraire Álvarez et al. (2013) utilisent des indicateurs environnementaux spécifiques, mais leurs discussions à ce sujet restent limitées. Pourtant c'est aussi ce que proposent Cullis et Gorgens (2006) en adoptant des bases de données cartographiques pour construire certains indicateurs du *water poverty mapping*, qui repose sur les fondements épistémologiques de l'IPE mais qui réduit le nombre d'indicateurs inclus dans les calculs (Section 1.3.1). Cette stratégie est présentement adoptée pour diagnostiquer la vulnérabilité associée aux pénuries en eau. Le premier sous-objectif peut donc être formulé comme suit :

**Construire les indicateurs de ressource et d'environnement de manière spécifique,  
afin de réaffirmer l'interdisciplinarité du diagnostic.**

Cela suppose d'adapter la *focale analytique* employée pour la construction de ces indicateurs. A ce sujet, il faut signaler que les analyses cartographiques enrichissent notablement la connaissance des dynamiques de l'éco-hydrosystème, de telle sorte que des bases de données hydrologiques et environnementales permettent de développer les diagnostics de plus en plus précis sur cet objet d'étude complexe (Revenga, 2005 ; Vörösmarty et al., 2005 ; Wilk et Jonsson, 2013). De fait, Álvarez et al. (2013), mais plus encore Cullis et Gorgens (2006) construisent les indicateurs environnementaux à partir de bases de données cartographiques.



La modélisation cartographique permet d'élaborer des analyses en tenant compte de l'hétérogénéité des territoires. A ce titre, elle présente de nombreux atouts pour étudier les vulnérabilités (Arreguin et al., 2015 ; IPCC, 2014) ; c'est pourquoi elle tient une place importante dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité et de l'aide à la prise de décisions (Section 1.1.2 et 1.1.3). Ces caractéristiques avaient d'ailleurs attiré l'attention des concepteurs de l'IPE à son origine : « *the structure of the Water Poverty Index would be determined possibly as a calculation of a 'water poverty line', perhaps as a calculation of 'the water poverty gap', even as a GIS-based decision tool, or perhaps a combination of all of these* »<sup>74</sup> (Sullivan, 2002). Autrement dit, l'IPE pourrait être décliné sous la forme d'analyses SIG. Depuis lors, quelques études ont amorcé des réflexions sur l'intégration d'outils cartographiques et d'analyse territorialisées dans la méthode de calcul de l'IPE (Abraham et al., 2002 ; Cullis et Gorgens, 2006 ; López et al., 2013 ; Nihila, 2012 ; Wilk et Jonsson, 2013). En outre, il faut rappeler que la cartographie a souvent été utilisée dans les représentations finales de l'IPE (Section 1.2.3). Enfin, au Mexique Castelazo et al. (2007) calculent l'IPE dans le cadre d'une étude de vulnérabilité, et cela le pousse à ajouter une dimension géographique<sup>75</sup>.

Cependant tous les avantages des Systèmes d'Information Géographique (SIG) n'ont pas été exploités conjointement pour calculer l'IPE à l'échelle régionale. Dans le cadre du *water poverty mapping* par exemple, il s'agit seulement de profiter du fait que les SIG offrent un éventail d'indicateurs environnementaux particulièrement riches et détaillés (Cullis et Gorgens, 2006 ; Nihila, 2012). Mais la méthodologie employée implique ensuite des pertes (en nombre, mais aussi en précision) en ce qui concerne la richesse des indicateurs (Section 1.3.1). Or certains outils SIG permettent d'élaborer des AMC en tenant compte de l'hétérogénéité écosystémiques des territoires considérés, en particulier à travers des opérations d'Evaluation Multicritère (EMC) transparentes et réitérables (Section 1.4.2). De tels outils pourraient générer un IPE pertinent en augmentant la visibilité des facteurs hydrologiques et

---

<sup>74</sup> « la structure de l'IPE pourrait être définie comme un calcul de 'ligne de pauvreté en eau', ou peut-être comme un calcul de 'brèche de pauvreté en eau', ou même comme un outil de décision fondé sur une analyse SIG, ou encore comme une combinaison de tout cela »

<sup>75</sup> La présente étude s'inspire de cette démarche, mais s'en distingue aussi doublement : d'une part, l'étude de Castelazo et al. (2007) s'intéresse spécifiquement au phénomène d'inondation qui n'entre pas dans le cadre de la présente étude, et d'autre part au lieu d'ajouter une composante comme le font ces auteurs, la présente étude adopte une approche géographique pour caractériser les territoires.

environnementaux. C'est pourquoi la présente étude considère leur utilisation pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité liée aux pénuries en eau. Le second sous-objectif est donc formulé comme suit :

**Construire l'IPE en appliquant une EMC pour augmenter la visibilité des indicateurs de ressource et d'environnement et renforcer l'interdisciplinarité des résultats.**

Ce sous-objectif soulève par définition des interrogations concernant la cohérence et la clarté des résultats, mais aussi concernant la simplification de la réalité (Section 1.1.3).

A ce sujet, il faut noter que la méthode qui est présentement développée au Mexique se situe entre deux traditions de diagnostic (présentées dans le point précédent), à savoir l'IPE et l'Atlas de vulnérabilité. Or celles-ci possèdent des représentativités territoriales très différentes. De fait, l'IPE génère un diagnostic synthétique et multidimensionnel, mais dans ce contexte les stratégies développées pour atteindre une représentativité territoriale tendent à limiter la répliquabilité de la méthode (Castelazo et al., 2007 ; Fenwick, 2010 ; López et al., 2013). Au contraire, l'Atlas de vulnérabilité systématise la méthodologie pour tout le pays, et croise plusieurs échelles de données pour garantir la précision des résultats, mais les différentes dimensions de la vulnérabilité sont étudiées séparément (Arreguin, 2015). En utilisant l'IPE pour réaliser un diagnostic de vulnérabilité, le troisième sous-objectif consiste à associer (en les hiérarchisant) ces deux perspectives :

**Adopter une méthodologie réutilisable (pour le moins au Mexique) et permettant d'obtenir des résultats synthétiques mais aussi représentatifs de la diversité territoriale.**

A l'échelle régionale, ce sous-objectif implique de réfléchir conjointement à l'utilisation des données publiques, et à la définition des échelles et des unités de calcul (Section 1.3.1 et 1.3.2). Mais, elle va aussi de pair avec des interrogations thématiques. Tout d'abord, le fait que le diagnostic relatif à la qualité de l'eau soit le seul qui n'est pas présenté à l'échelle municipale dans l'Atlas de vulnérabilité génère une interrogation particulière par rapport à cette thématique au Mexique (Arreguin Cortés, 2015). De la même façon, il faut rappeler ici que l'intégration et la représentation des problématiques rurales et agricoles dans les calculs de l'IPE pose question (Section 1.3.1). Dans le cadre de la réalisation d'un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau, ce questionnement est d'autant plus

important (Section 1.1.1), et mérite donc une attention spéciale. C'est pourquoi un dernier sous-objectif est fixé comme suit pour augmenter la représentativité des résultats de l'IPE :

**Favoriser l'identification des facteurs potentiellement problématiques, associés aux milieux agricoles et ruraux.**

La réflexion porte en l'occurrence sur les unités de calcul et sur la compensation autorisée dans l'AMC (Abraham et al., 2002 ; Garriga et Foguet, 2010a). De fait, les SIG étant avant tout un outil d'analyses concernant l'hétérogénéité des territoires tant du point de vue socio-économique que du point de vue environnemental et hydrologique, ils comportent des alternatives statistiques et cartographiques intéressantes de ce point de vue.

Ces quatre sous-objectifs mènent à calculer l'IPE dans l'Etat de Chihuahua (le choix de cet état est justifié dans la section 2.1) à travers une approche cartographique. La méthodologie déployée explore différentes alternatives d'EMC.

*1.4.2 Réaliser un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau en adoptant des outils SIG pour construire l'IPE*

Pour réaliser un diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilité associée aux pénuries en eau, la présente étude adopte la *focale analytique*<sup>76</sup> de l'IPE (ces cinq composantes) mais opère les phases de calcul à travers des outils cartographiques. Ceux-ci permettent d'élaborer des analyses en tenant compte de l'hétérogénéité des territoires, et tient donc une place importante dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité et de l'aide à la prise de décisions (Section 1.1). Face à ce constat, les concepteurs de l'IPE avaient eux-mêmes commenté que la méthodologie de l'IPE pourrait prendre la forme d'analyses SIG (Sullivan, 2002). Certains traitements SIG ouvrent perspectives intéressantes pour élaborer et agréger des indicateurs à partir de bases de données statistiques mais aussi cartographiques. L'une des principales contributions de cette étude repose sur l'exploration de ces alternatives pour calculer l'IPE.

---

<sup>76</sup> Ce terme, emprunté à Vollmer et al. (2016), est défini dans la section 1.1.2.

Cette section présente les bases de données et les outils SIG qui sont employés pour atteindre les sous-objectifs de calcul de l'indice l'IPE fixés dans la Section 1.4.1.

- Séparer les approches analytiques et préciser les lignes directrices de la construction des composantes de ressource et d'environnement

Le diagnostic est élaboré en employant la *focale analytique* de l'IPE, et repose donc sur ces cinq composantes. Néanmoins les lignes directrices de construction des composantes sont précisées de telle sorte à séparer les approches analytiques. En particulier, la présente étude concentre le diagnostic de développement dans les composantes d'accès, de capacité et d'usage, afin que les deux autres composantes (environnement et ressource) s'intéressent aux aspects hydrologiques et environnementaux. Les composantes sont donc redéfinies comme suit :

- ✓ la composante d'accès analyse les infrastructures matérielles qui interviennent dans la gestion de l'eau pour chaque type d'usage (domestique, industriel, agricole et associé à l'élevage) ;
- ✓ la composante de capacité considère quant à elle les infrastructures sociales et économiques qui permettent ou non de garantir l'accès à l'eau ;
- ✓ la composante d'usage permet d'évaluer comment la ressource hydrique entre dans le cadre de la reproduction économique et sociale des sociétés considérées ;
- ✓ la composante d'environnement mesure l'intégrité environnementale de l'écosystème, en se concentrant sur les caractéristiques de contamination de la ressource et de dégradation environnementale liée à l'hydrosystème et à sa gestion ;
- ✓ et la composante de ressource pour sa part, mesure la quantité d'eau sur le territoire.

Ces définitions conservent accès, capacité et usage, mais apportent quelques nuances importantes concernant les deux autres. En l'occurrence, la composante d'environnement évalue traditionnellement l'état de préservation de l'écosystème en lui-même. Mais de fait, sa préservation influence notablement l'hydrosystème ; et à ce jour, il est établi que certaines caractéristiques (couverture végétale, érosion, état des ressources souterraines, etc.) sont particulièrement importantes à ce niveau. La composante d'environnement présentement définie se centre donc spécifiquement sur ces caractéristiques. De plus, le terme « disponibilité » a été exclu de la définition concernant ressource : en effet, depuis les travaux

de Falkenmark (1989) ce terme désigne l'analyse conjointe des facteurs hydrosystémiques et sociosystémiques. Dans le cadre de l'étude de la pénurie en eau, il fait référence à deux objets d'études distincts. En le supprimant, la définition proposée s'écarte de la tradition qui s'intéresse notamment aux capacités d'extractions qui dépendent tant du contexte hydrologique que des infrastructures d'approvisionnement (Estados Unidos Mexicanos, 2011), pour s'inscrire dans celles des études hydrologiques.

Afin de réaffirmer l'interdisciplinarité de l'IPE, ces nuances conduisent finalement à séparer les approches adoptées dans l'étude des composantes. La Tableau 6 indique que les adaptations apportées aux *focales analytiques* de l'IPE concernent exclusivement les composantes de ressource et d'environnement.

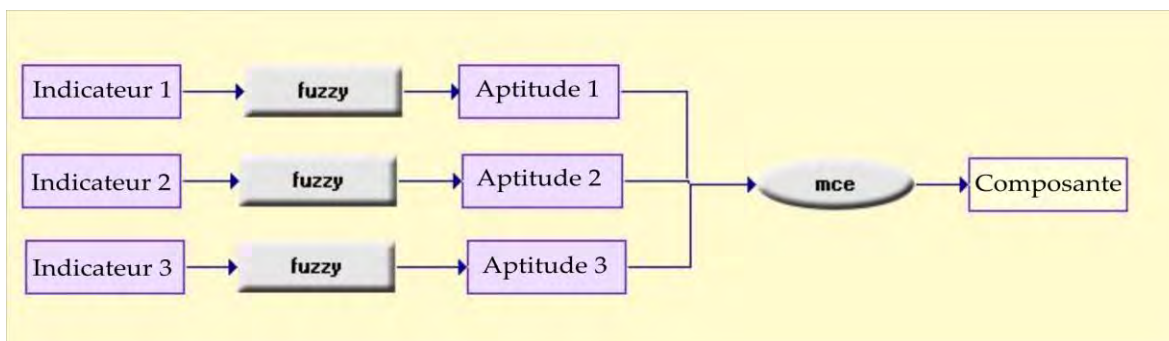
|                      | Composantes de l'IPE | Approches                           |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Eco et hydrosystèmes | Ressource            | Hydrologique                        |
|                      | Environnement        | Ecosystémique et chimique           |
| Sociosystème         | Accès                | Caractérisation des infrastructures |
|                      | Capacité             | Développement humain                |
|                      | Usage                | Economique                          |

**Tableau 6 : Répartition des « capitaux » au sein des composantes révisées de l'IPE**

Conformément à la tradition de l'IPE, ces composantes reposent sur des indicateurs élaborés à partir de données publiques (précisés dans la section 2.3). Néanmoins, les données sont sélectionnées en fonction de deux critères qui viennent s'ajouter aux objectifs de précision : elles doivent être utilisables partout au Mexique et respecter les approches décrites dans le Tableau 6. Pour ce faire, en suivant l'exemple du *water poverty mapping* de Cullis et Gorgens (2006), les composantes de ressource et d'environnement privilégient les bases de données cartographiques. L'IPE est donc calculé en associant aux bases de données statistiques traditionnelles, des bases de données cartographiques ; et pour conserver la richesse de ces deux ensembles de données, elles sont agrégées à travers une EMC.

- Présentation des Evaluations Multicritères (EMC) et de la méthode « FUZZY »

Les analyses cartographiques permettent d'aider les prises de décision relatives à la gestion du territoire (Revenga, 2005 ; Vörösmarty, et al., 2005 ; Wilk et Jonsson, 2013). Certains outils SIG permettent d'appliquer des AMC exactement comme le fait la méthode traditionnelle de l'IPE, mais d'autres outils comportent aussi des alternatives intéressantes. En l'occurrence, l'EMC appartient à la famille des AMC en développant des analyses permettant de générer des cartes d'aptitudes à partir d'une multitude de facteurs (Roy, 1991). Les cartes d'aptitudes présentent des résultats compris entre 0 et 1 (ou entre 0 et 255), où 0 représente les conditions les moins aptes, et où 1 (ou 255) représente les conditions les plus aptes. En normalisant puis en agrégeant les critères établis, ces cartes permettent de comparer les territoires entre eux. Depuis 1990, l'EMC est mise en œuvre grâce au logiciel TerrSet (ex Idrisi). Elle s'opère alors à travers deux modules, nommément « *FUZZY* », et EMC (Figure 4).



**Figure 4 : Les étapes d'AMC opérée avec le logiciel TerrSet, exemple d'EMC pour une composante intégrant trois indicateurs**

Le module « *FUZZY* » sert à normaliser les indicateurs (Section 1.1.3) en adoptant une démarche dite de standardisation (Jiang et Eastman, 2010). En l'occurrence, il s'agit d'appliquer des fonctions d'appartenances qui convertissent les valeurs d'origines en degrés d'aptitudes. L'objectif est de définir les conditions aptes et non-aptées de chaque indicateur, en considérant que l'évolution d'un état vers l'autre peut être progressive (Eastman et al., 1993 ; Yager, 1995). A travers la sélection de seuils, les données sont classées dans quatre ensembles : les ensembles  $> a$  ou  $< d$  qui ne sont pas aptes, l'ensemble  $[bc]$  qui est apte, et les ensembles  $[ab]$  et  $[cd]$  qui ont respectivement des aptitudes croissantes ou décroissantes. Quatre fonctions mathématiques permettent de définir le comportement de chaque indicateur concernant les transitions d'un état à l'autre (

Figure 5). Les séries de nombres ainsi obtenues sont comprises entre 0 et 1 (ou entre 0 et 255), et peuvent être agrégées entre elles.

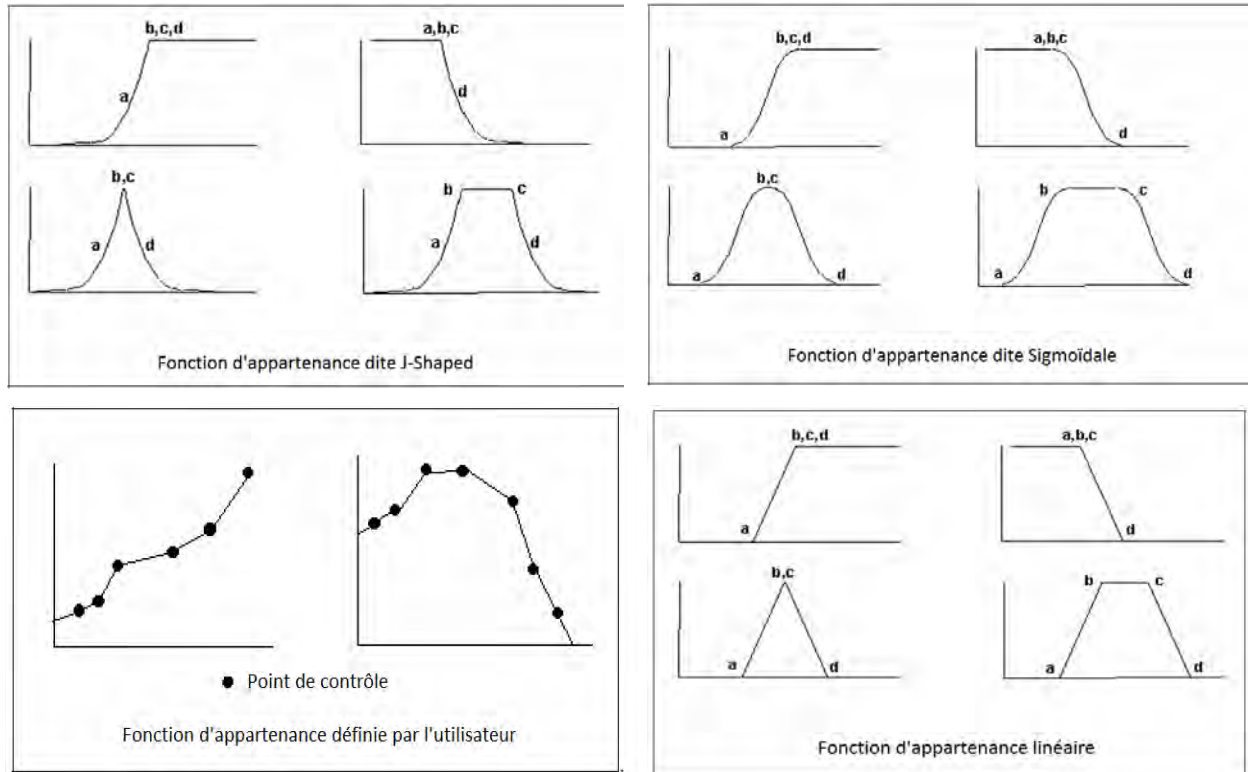


Figure 5 : Les quatre fonctions d'aptitude définies dans l'analyse « FUZZY » (Eastman, 2016)

D'après l'OCDE, les opérations de standardisation sont très proches de l'approche min-max qui est majoritairement employée pour élaborer l'IPE (Manandhar et al., 2012). Dans les deux cas, il s'agit en effet de situer les valeurs par rapport à des seuils pré-établis. Néanmoins le caractère *data specific* des seuils adoptés dans l'approche min-max limite les possibilités de comparaison des différentes études de l'IPE (Section 1.3.3), alors que le concept d'aptitude employée dans l'approche « FUZZY » favorise la définition de seuils réutilisables. A ce titre, la méthode « FUZZY » – et par extension l'EMC – s'avère intéressante pour favoriser la répliquabilité de l'IPE. En outre, les fonctions d'appartenance permettent de préserver la richesse des indicateurs hydrologiques et environnementaux, et constituent donc aussi une opportunité intéressante pour l'interdisciplinarité des résultats. Pour ces deux raisons, la normalisation de l'IPE est opérée dans cette étude à travers l'approche « FUZZY ». Il faut préciser à ce stade, que sous TerrSet, l'EMC s'applique sous la forme spécifique des cartes raster.

- Description des cartes raster et des unités de calcul

Dans le cadre des indices, les unités de calcul sont définies à partir de délimitations préétablies, et correspondent souvent de ce fait aux entités administratives (Section 1.2.3) : les bases de données se présentent alors sous forme de tableaux d'indicateurs, qui attribuent à chacune d'entre elles une valeur par unité. Mais pour appliquer l'EMC sous TerrSet ces bases de données statistiques sont remplacées par des cartes dites raster (Eastman et al., 1995). Dans ces cartes, chaque pixel représente une entité géométrique singulière qui est de fait une unité d'analyse et de calcul. Au sein d'une carte, les pixels reçoivent chacun une valeur, exactement comme les bases de données statistiques attribuent une valeur d'indicateur à chaque unité de calcul<sup>77</sup>, dans la démarche de Sullivan et al. (2002) et même dans celle d'Abraham et al. (2002). Une carte raster recense les valeurs de tous les pixels pour un indicateur spécifique ; et grâce aux opérations d'EMC, TerrSet permet d'agréger différentes cartes tout comme les indices agrègent différents indicateurs entre eux.

Dans la perspective d'utiliser des cartes raster pour calculer l'IPE, il est important de signaler qu'il est possible de convertir des bases de données statistiques en cartes raster, et vice-versa. L'étude de Nihila (2012) utilise justement des bases de données cartographiques et les convertit ensuite sous la forme de bases de données statistiques. Mais il faut noter que cette opération conduit à transformer les informations cartographiques et à perdre une partie de leur richesse. Ces pertes poussent d'ailleurs l'auteure à présenter conjointement les résultats de l'IPE, et les cartes analysant spécifiquement les dynamiques environnementales. Cette démarche confirme l'intérêt particulier du format raster dans le cadre des diagnostics interdisciplinaires.

Sous le format raster les entités administratives sont divisées en plusieurs unités géométriques (ou pixel). A condition d'adapter la taille des pixels comme il faut, les cartes raster peuvent ainsi rendre compte des variations environnementales, hydrologiques etc. qui transcendent les limites administratives

---

<sup>77</sup> La seule différence entre ces bases de données consiste dans le fait que les unes sont présentées sous forme de tableau à double entrée, alors que les autres sont présentées sous forme de quadrillage. L'identification des unités de calculs est donc nominative d'un côté, et graphique de l'autre. Notons que sous cette forme, une carte raster synthétise par conséquent les valeurs pour un seul indicateur ; il n'est en effet pas possible de superposer plusieurs indicateurs dans une même carte raster, à moins de les agréger.



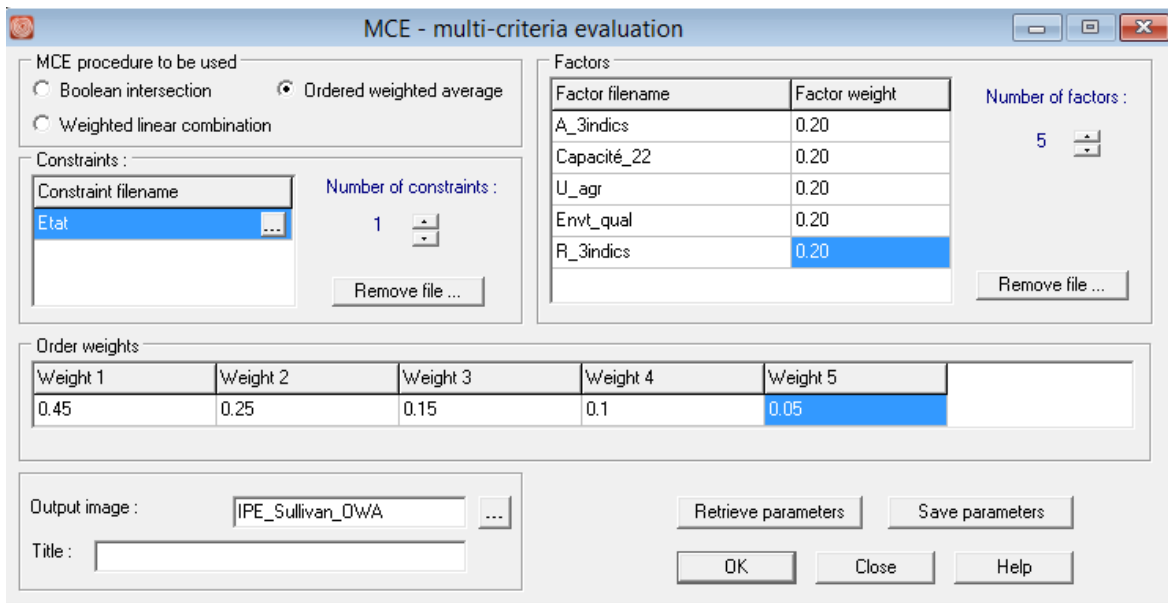
et ne peuvent pas être recensées telle que dans les bases de données statistiques. Autrement dit, le format raster permet de respecter les continuités spatiales. L'intérêt que cela représente est d'autant plus notable dans le cadre de l'AMC, car il devient possible de valoriser plusieurs échelles d'indicateurs. En effet, deux pixels voisins peuvent présenter des comportements similaires pour certains indicateurs, et des comportements différents pour d'autres. De cette manière, les résultats finaux expriment différents degrés de variations qui font ressortir les caractéristiques géographiques du territoire (Maestripiéri, 2012).

En parallèle, la conversion des bases de données statistiques au format raster est possible à partir du moment où elles peuvent être représentées de manière cartographique. Cette opération peut occasionner des pertes d'informations, car les cartes raster requièrent que toutes les données soient spatialement identifiées et singularisées. En l'occurrence, la représentation cartographique de certaines données locales peut poser problème. Mais dans le cadre d'analyses effectuées aux échelles régionales (comme c'est le cas de la présente étude), la conversion au format raster conserve la richesse des informations statistiques. Par définition, l'association de toutes les aires d'influence régionales couvre les territoires administrés de manière continue et sans juxtaposition. Par conséquent, à l'échelle régionale – et selon la résolution des données cartographiques – le format raster pourrait donner une visibilité intéressante aux indicateurs hydrologiques et environnementaux tout en permettant de valoriser les indicateurs socio-économiques traditionnels de l'IPE.

Ces atouts font écho à la proposition d'Abraham et al. (2002) : en divisant le territoire et en créant tant que possible des unités homogènes, la représentativité territoriale des analyses se trouve renforcée. Comparativement à cette proposition, les cartes raster présentent l'avantage d'être aisément applicables à l'échelle régionale : elles évitent de devoir opérer une pré-analyse du territoire, puisque la résolution des données définit directement les unités de calculs. Mais il faut ajouter à cela qu'en associant les avantages des pixels avec ceux d'une, les cartes raster issues de l'EMC peuvent aussi donner à voir des variations de pauvreté en eau spécifiques aux milieux agricoles et ruraux. De fait, les outils SIG ouvrent la voie à plusieurs options de spatialisation et d'agrégation des données permettant d'adapter la représentativité territoriale des résultats aux sous-objectifs de calcul de l'IPE.

- Agréger les composantes à travers l'EMC : faire varier la compensation en appliquant une *Ordered Weithing Average* (OWA)

Pour procéder à l'agrégation des cartes raster, le logiciel TerrSet propose un module dit MCE (Figure 6). Celui-ci permet d'appliquer des pondérations et des opérations statistiques sur les cartes qui sont autant de facteurs intégrés dans l'AMC (Eastman et al., 1993 ; Saaty, 1987 ; Yager, 1988). L'agrégation peut être effectuée à travers une moyenne pondérée, exactement comme c'est le cas pour l'IPE. Mais le module de TerrSet permet aussi de faire varier le phénomène de compensation en adoptant une méthode *Ordered Weithing Average* (OWA) (Figure 6). Cette alternative semble intéressante dans le cadre du calcul de l'IPE (Section 1.3.1).



**Figure 6 : Application EMC proposée dans le logiciel TerrSet**

Pour rappeler la définition donnée dans la Section 1.3.1, la compensation est un mécanisme statistique qui neutralise « *a low suitability score of one factor by a high suitability score of a another factor* »<sup>78</sup> (Paegelow et Olmedo, 2005). Ce phénomène est total dans le cas des moyennes pondérées, mais d'autres opérations d'agrégation permettent de le réduire. En l'occurrence, à travers la méthode OWA une seconde série de pondération, appelée poids d'ordre, est ajoutée à la pondération traditionnelle dans le

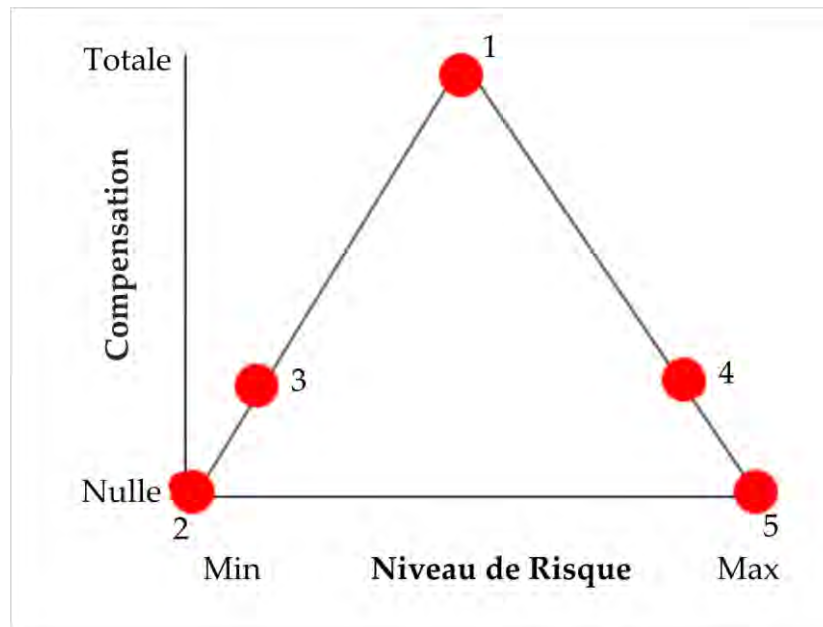
<sup>78</sup> « L'aptitude basse d'un facteur avec l'aptitude haute d'un autre facteur »

but de faire varier la compensation (Jiang et Eastman, 2010). Cette seconde série se distingue de la première par le fait qu'elle est spécifique à chaque unité de calcul : sous le format raster, elle varie donc pour chaque pixel. Concrètement, les aptitudes obtenues pour chaque unité de calcul sont classées de la plus basse à la plus haute. Le classement ainsi établi détermine directement les poids d'ordre qui permettent de choisir quelles aptitudes seront les plus visibles : exclusivement les plus aptes ou les moins aptes, ou bien toutes mais en insistant sur les plus aptes, etc. (Chiclaná et al., 2007 ; Yager et Xu, 2006).

En somme, pour chaque pixel, la méthode OWA pondère les facteurs en fonction de leur aptitude. Dès lors, plusieurs stratégies de compensation peuvent être employées. Paegelow (2018) explique ces stratégies de la manière suivante :

*“Most MCA techniques sum the weighted suitability scores and the user computes the average suitability score. This means total trade off: a place with a critical suitability score for one important factor may be rescued by some other factors presenting high scores on this place. Allowing full trade off is also risk taking while limiting the impact of each factor on the final score is risk averse. MCE therefore offers the possibility to use so called order weights. The number of order weights is equal to the number of factors and their sum is equal to 1. Unlike factor weights there are space specific: for each location (pixel) the weighted factors are ranked from the lowest (left) to the highest (right). Order weights are given for each position in the ranking. Giving the same weight to all positions means free trade off (strategy 1 [in Graphique 1]). At the opposite, putting all the weight on the most left (the location specific lowest) factor, is risk averse and means no trade off (strategy 2). The contrary (putting 100 % of order weight to the, locally, highest factors also excludes any trade off but is the most risk taking option (strategy 3). The driving possibilities by combining these two criteria form a so called decision space in form of a triangle. The combination of trade off and risk levels allows to move on the sides of the triangle. Using this so*

called order weighted averaging (OWA) allows to perform different designs of suitability maps”<sup>79</sup> (Paegelow, 2018).



**Graphique 1 : Technique OWA pour adapter le niveau de compensation et de risque (adapté de Eastman et al. 1993)**

<sup>79</sup> « La plupart des AMC additionnent les scores d’aptitudes pondérés et l’utilisateur calcule l’aptitude moyenne. Cela implique que la compensation est totale : un territoire présentant une aptitude critique pour un facteur serait compensé par d’autres facteurs présentant des aptitudes hautes sur ce même territoire. Autoriser une compensation totale est risqué, alors que limiter l’impact de chaque facteur est prudent. L’EMC offre par conséquent la possibilité d’utiliser ce qu’on appelle des poids d’ordre. Le numéro de poids d’ordre correspond au nombre de facteurs, et leur somme est égale à 1. Contrairement aux pondérations, les poids d’ordre dépendent des unités où elles sont calculées : pour chaque localisation (pixel), les facteurs pondérés sont ordonnés depuis le plus bas (à gauche) jusqu’au plus haut (à droite). Et le poids d’ordre est attribué à chaque position de cette classification. En attribuant le même poids d’ordre à toutes les positions, la compensation est libre (stratégie 1 [dans le Graphique 1]). Au contraire, en attribuant tout le poids au facteur de gauche (le plus bas pour chaque unité considérée) la prise de risque est minimum et la compensation est nulle (stratégie 2). Enfin, en attribuant 100% du poids au facteur le plus haut (par unité), la compensation est nulle aussi mais il s’agit de l’option la plus risquée (stratégie 3). Les possibilités existant pour associer ces critères dessinent ce qu’on appelle l’espace de décision, en forme de triangle. L’association des différents niveaux de compensation et de risque permet de bouger le long des côtés de ce triangle. Cette méthode appelée moyenne ordonnée pondérée (OWA d’après son sigle anglais) permet de former différentes cartes d’aptitudes ».

La littérature spécialisée détermine donc les stratégies de compensation d'après le niveau de risque des prises de décisions (Paegelow et Olmedo, 2005). Cela s'entend car la méthode OWA est souvent employée pour réaliser des projections, et en définir des scénarios à venir. Dès lors, si les projections sont réalisées en maximisant l'influence des facteurs les plus problématiques, la prise de risque des décideurs est plus restreinte que si les projections maximisent celle des facteurs les moins problématiques : dans le premier cas, il s'agit d'un scénario pessimiste, alors que dans le second cas, le scénario est optimiste. Mais dans le cas présent, la méthode est considérée pour effectuer un diagnostic a posteriori (et non pour effectuer une projection). Dans ce cadre, il n'est pas question de construire de scénarios, mais faire varier la compensation permet d'insister sur les facteurs plus ou moins problématiques : leur visibilité étant plus ou moins grande dans les résultats selon la stratégie adoptée. Dans ce cadre, la dimension prospective de l'expression « niveau de risque » pose question, mais la démarche reste la même. En conséquence, la méthodologie de sélection du niveau de risque est conservée dans cette étude mais la terminologie est adaptée pour signifier cette nuance (Tableau 7).

| Niveau de risque | Stratégie de compensation          | Aptitude minimale | Aptitude inter-médinaire | Aptitude inter-médinaire | Aptitude inter-médinaire | Aptitude maximale |
|------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Risque minimum   | Compensation nulle                 | 1                 | 0                        | 0                        | 0                        | 0                 |
| Risque faible    | Exemple de compensation pessimiste | 0.45              | 0.25                     | 0.15                     | 0.1                      | 0.05              |
| Risque moyen     | Compensation totale                | 0.25              | 0.25                     | 0.25                     | 0.25                     | 0.25              |
| Risque fort      | Exemple de compensation optimiste  | 0.05              | 0.1                      | 0.15                     | 0.25                     | 0.45              |
| Risque maximum   | Compensation nulle                 | 0                 | 0                        | 0                        | 0                        | 1                 |

**Tableau 7 : Les stratégies de la méthode OWA, exemple de compensation pour cinq facteurs**

Cette méthode offre donc plus d'alternatives encore que l'équation de Garriga et Foguet (2010a) pour faire varier la compensation dans l'IPE (Section 1.3.1). A ce titre, elle est intéressante pour adapter la représentativité territoriale de l'indice.

Au vu de ces atouts, l'EMC incluse dans TerrSet est présentement utilisée pour élaborer l'IPE dans l'Etat de Chihuahua (Mexique). En l'occurrence, différentes alternatives sont explorées afin de développer un diagnostic cartographique de vulnérabilité associée aux pénuries en eau à l'échelle régionale. Mais pour renforcer l'interdisciplinarité du diagnostic, cette étude associe aussi les méthodes qualitatives et quantitatives.

#### *1.4.3 Compléter l'IPE par une analyse de discours pour diagnostiquer la vulnérabilité de manière interdisciplinaire et sans perdre de vue l'aide à la décision*

Cette étude interroge l'outil de diagnostic interdisciplinaire qu'est l'IPE, afin d'intégrer les dimensions environnementales et sociales de la vulnérabilité liée aux pénuries en eau. Or, l'adaptation cartographique de l'IPE-SIG ne permet pas d'aborder aussi systématiquement tous les facteurs clés qui déterminent la vulnérabilité (Section 1.1.2). Cet indice renseigne clairement sur l'exposition aux pénuries en eau, et sur certaines fragilités, mais il parle finalement peu des stratégies spécifiquement adoptées pour faire face aux pénuries et ne dit rien des interactions sociales ni de la fragilité institutionnelle qui jouent des rôles fondamentaux dans la vulnérabilité sociale. Pour aborder ces objets d'étude, la littérature spécialisée emploie traditionnellement des analyses qualitatives de discours (Section 1.1.2). Celles-ci sont appliquées à des échelles d'études locales, et génèrent souvent des résultats qui sont difficilement valorisables pour l'aide à la prise de décision. Cette section aborde donc la question du diagnostic des vulnérabilités sociales : elle définit comment l'IPE-SIG pourrait être complété, en accord avec la tradition qualitative mais en prenant aussi en considération une finalité opérationnelle.

- Apports et limites de l'IPE-SIG pour l'étude de la vulnérabilité sociale associée aux pénuries en eau

L'IPE-SIG répond à une partie des interrogations relatives au diagnostic des vulnérabilités aux pénuries en eau (ces interrogations sont soulevées dans la Section 1.1.3). En particulier, le travail épistémologique de Sullivan et al. (2002) permet d'associer les multiples dimensions socioéconomiques et hydro-écologiques qui interviennent dans l'exposition aux pénuries en eau (Sections 1.2.1). Le panorama élaboré avec l'indice prend en compte les variations hydrologiques, mais aussi les infrastructures (matérielles et immatérielles) qui jouent un rôle fondamental dans l'accès à l'eau, et des aspects environnementaux considérés comme importants pour la reproduction sociale (Sections 1.1.1 et 1.2.1). A cela, il faut ajouter que l'IPE se distingue des autres indices de pénurie en eau en conférant une place centrale à la pauvreté (Section 1.2). Cela constitue un double atout pour le diagnostic de vulnérabilité. Tout d'abord, le paradigme de la pauvreté a été adopté dans une démarche de collaboration avec la société : ce faisant l'indice adopte une perspective d'aide à la prise de décision qui le rend particulièrement intéressant pour l'étude de la vulnérabilité. En outre, la pauvreté comprise de manière multidimensionnelle (dans la lignée des travaux de Amartya Sen présentés dans la Section 1.1.1) constitue un objet d'étude à part entière dans l'étude des vulnérabilités sociales (Becerra, 2012 ; Lallau, 2008). Par conséquent, ce paradigme lie les deux traditions de diagnostic et explique en partie les rapprochements opérés entre autre par Castelazo et al. (2007) ou par Fenwick (2010) (Section 1.1.3). En somme, dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité l'IPE apporte des éléments de réponse important en termes d'exposition aux pénuries en eau et de fragilités physiques, sociales, économiques et environnementales (Sections 1.1.2 et 1.1.3<sup>80</sup>). Les résultats obtenus en adoptant des alternatives cartographiques pour calculer cet indice (IPE-SIG) sont alors d'autant plus pertinents qu'ils intègrent aussi une analyse sur l'expression territoriale des pénuries en eau et des vulnérabilités (Section 1.4.2). Mais si l'IPE-SIG s'inscrit dans des traditions notoires d'aide à la prise de décision, le diagnostic réalisé à partir de ce seul outil comprend aussi des limites au regard des processus sociaux qui déterminent la vulnérabilité.

---

<sup>80</sup> Les frontières entre les facteurs clés de l'exposition et de la fragilité ont été plusieurs fois présentées comme floues : d'une part dans la présentation de l'approche MOVE (Section 1.1.2) et d'autre part en ce qui concerne la vulnérabilité spécifiquement liée aux pénuries en eau (Section 1.1.3). En conséquence, il est difficile de démêler la part exacte de l'IPE dans chacun de ces facteurs clés, mais sa pertinence n'en est que plus forte.

En plus des fragilités physiques, sociales, économiques et environnementales, l'approche MOVE fait référence à des fragilités culturelles et institutionnelles (Birkmann et al., 2013). La première (fragilité culturelle), fait référence à une certaine relativité de la vulnérabilité. D'Ercole et al. (1998) ont mis en évidence que la vulnérabilité se transforme à travers l'espace et le temps, en fonction du contexte culturel. En particulier, il est avéré que l'identification d'un risque influence les stratégies d'actions des individus et des sociétés, et qu'un même risque n'affecte pas également les sociétés et les individus dont les valeurs et les pratiques sont différentes (Daupras, 2015 ; Sturma, 2013). Les aspects culturels affectent donc d'une part la fragilité, et d'autre part la résilience (les capacités) et l'adaptation des sociétés et des individus. Pourtant, aucune des deux applications de l'approche MOVE n'inclut d'indicateur d'ordre culturel, ce qui suggère que les aspects culturels sont difficilement appréhendés (et appréhendables) à travers le calcul d'indices tels que l'IPE (Birkmann et al., 2013). En ce qui concerne la fragilité institutionnelle, elle fait référence aux structures et aux fonctionnements socio-politiques à partir desquelles les sociétés sont organisées. Cette dimension fait écho à l'un des facteurs de pauvreté mis en évidence par l'approche des capacités (présentée dans la Section 1.1.1). Son importance est telle, que le renforcement des institutions est d'ailleurs l'objet du 16<sup>ème</sup> SDG défini par les UN (2017). A ce sujet, Birkmann et al. (2013) font mention d'un manque de capacité institutionnelle dans l'indice de vulnérabilité portant sur les tremblements de terre ; néanmoins l'indicateur concerné intervient dans les manques de capacités de résilience et non pas dans le facteur clé des fragilités. Cette démarche semble confirmer que les facteurs institutionnels jouent un rôle fondamental à tous les niveaux de la gestion du risque et des vulnérabilités (Becerra, 2012 ; Daupras, 2015 ; Sturma, 2013). En revanche, dans le contexte des inondations, Birkmann et al. (2013) n'incluent pas d'indicateur explicitement relatif aux institutions, et l'IPE non plus.

Ces objets d'étude ont en commun qu'ils sont situés à la limite entre les fragilités et les capacités du sociosystème, et qu'ils ne sont que peu abordés dans le cadre des calculs d'indices (qu'il s'agisse de MOVE ou de l'IPE). Or, Urquiza Gómez et Cadenas (2015) qui interrogent les approches systémiques dans le cadre spécifique de l'étude des vulnérabilités associées aux pénuries en eau, les présentent comme des dimensions essentielles pour le fonctionnement et l'adaptation du socioécosystème. Les auteurs insistent d'autant plus sur les interactions de nature socio-culturelles (notamment régies par des dimensions organisationnelles et institutionnelles) qu'elles impactent l'exposition elle-même (Section 1.1.3). Même si leurs focales analytiques sont conçues dans un cadre théorique systémique et



interdisciplinaire, l'apport des indices considérés dans cette étude (alternatives MOVE et IPE) reste limité pour aborder les fragilités culturelles et institutionnelles, ainsi que les capacités de résilience et d'adaptation des sociétés. De fait, ces points sont traditionnellement étudiés à travers des méthodologies qualitatives.

- Rapprochement des démarches qualitatives et quantitatives dans le cadre de l'aide à la prise de décision

Les approches qualitatives sont essentiellement définies *en opposition* avec les approches quantitatives (Kauffmann, 2011) : tandis que les unes emploient des analyses statistiques (et donc chiffrées), les autres emploient d'autres outils, les mots. Laperrière et Zuniga (2006) expliquent cette différence du fait que « la méthode qualitative traite des données difficilement quantifiables, qu'elle recourt à une méthode d'analyse souple et davantage inductive et qu'elle s'inspire de l'expérience de la vie quotidienne et du sens commun qu'elle essaie de systématiser ». L'analyse qualitative étant notamment appliquée pour étudier les discours, elle fait en l'occurrence une place aux discours dits profanes, par opposition aux discours d'experts entendus comme discours scientifiques (Sturma, 2013). Le dictionnaire Larousse (2019) propose plusieurs définitions pour le terme « discours » : la majorité d'entre elles l'associent à une expression orale, souvent longue et parfois même vaine ; mais de manière générique il s'agit d'une « manifestation écrite ou orale d'un état d'esprit ». Cette définition établit un lien direct entre le discours et la pensée, et a plusieurs implications dans les réflexions portant sur les sociétés et les comportements humains (Bardin, 1977 ; Pecheux, 1981 ; Reinert, 1999). En étudiant les discours du point de vue qualitatif, les sciences sociales postulent que « le savoir commun n'est pas un non-savoir, il recèle au contraire de trésors » (Kaufmann, 2011). Ce postulat est d'autant plus intéressant dans le cadre des rapprochements interdisciplinaires opérés pour aider la prise de décision.

D'après Prud'homme et Gingras (2015), l'accès à la décision publique explique la majorité des projets de recherche associant ce qu'ils appellent les sciences sociales et les sciences naturelles. Dans ce cadre, l'approche qualitative semble particulièrement intéressante puisqu'elle donne a priori une place au discours profanes dans les travaux scientifiques. Laperrière et Zuniga (2006) présentent ainsi la démarche qualitative comme une opportunité qui « permet une incorporation du particulier aux logiques de la généralisation scientifique [et] ouvre les portes de la légitimation aux options sociales critiques ».

Ces affirmations vont dans le sens de la complémentarité entre les approches qualitatives (qui donnent une place aux discours profanes) et les approches quantitatives (fondées sur les chiffres) pour l'élaboration de diagnostics opérationnels. En théorie, les analyses qualitatives peuvent compléter les diagnostics statistiques en leur donnant une teinte et des nuances en accord avec les contextes locaux (Berthier, 2006 ; Kauffmann, 2011 ; Quivy et Van Campenhoudt, 1995). De tels rapprochement font écho au cadre analytique MOVE qui insiste sur le caractère multi-scalaire de la vulnérabilité, et évoque conjointement les approches qualitatives et quantitatives (Birkmann et al., 2013). L'élaboration d'un diagnostic qui serait multiscalaire et plurivoque (élaboré à plusieurs voix ou en l'occurrence à partir de plusieurs discours) serait donc particulièrement pertinente dans le cadre de l'aide à la prise de décision.

Cependant le rapprochement des démarches qualitatives et quantitatives est difficile au sein même des sciences sociales, où il génère de nombreux débats (Berthier, 2006). *L'opposition* entre qualitatif et quantitatif est reprise à plus forte raison lorsqu'il s'inscrit dans le cadre de rapprochements interdisciplinaires, au sein desquels la scientificité des sciences sociales est mise en cause (Prud'homme et Gingras, 2015). Les approches qualitatives sont alors critiquées en raison de leur manque de portée opérationnelle. A ce sujet, Becerra (2012) signale « la difficulté pour les chercheurs à sortir de leur posture d'analystes. Cette difficulté dans l'opérationnalisation des connaissances est sans doute due également aux impacts potentiels des recherches sur la vulnérabilité sociale en termes de responsabilité, de prise de décision politique et d'action collective ». Dans ce contexte la richesse des analyses qualitatives en sciences sociales garantit leur pérennité, notamment pour l'étude de la vulnérabilité sociale (Section 1.1.2), tout en les confinant dans une certaine marginalité. Or, l'intérêt croissant pour les indices pourrait constituer une opportunité pour les rapprochements des disciplines et des méthodes : les approches qualitatives peuvent revendiquer leur intérêt par rapport aux dimensions culturelles et institutionnelles qui sont plus ou moins laissées pour compte à ce jour par les approches quantitatives. A cette fin, la condition sine qua non porte sur l'opérationnalité des analyses.

Voilà pourquoi, la présente étude fixe un dernier sous-objectif :

**Analyser qualitativement les discours afin de compléter les résultats obtenus avec l'IPE-SIG du point de vue de la vulnérabilité sociale associée aux pénuries en eau dans une perspective d'aide à la prise de décision.**

Cette analyse sociale a vocation à nuancer et enrichir le diagnostic de vulnérabilité établi par l'IPE-SIG, mais elle doit engendrer des résultats synthétiques pour répondre aux exigences de l'aide à la prise de décision.

- Identifier les relations qui déterminent la vulnérabilité sociale liée aux pénuries en eau et synthétiser les résultats (dans une approche AFFOM) pour opérationnaliser le diagnostic

L'analyse des discours est employée dans la plupart des sciences humaines et sociales (Blanchet, 1985). Elle apporte des éléments de réflexion variés pour appréhender les sociétés et les comportements humains et s'avère donc utile dans les études sociologiques, ethnographiques, psychologiques, etc. (Bardin, 1977 ; Pecheux, 1981 ; Reinert, 1999). De fait, les discours peuvent être analysés de plusieurs points de vue qui comprennent des perspectives intéressantes par rapport à la vulnérabilité sociale. Dès lors, comme pour le calcul de l'IPE, il convient de définir clairement l'objectif du diagnostic. Dans le cas présent, l'analyse de discours entre dans le cadre de l'étude interdisciplinaire de la vulnérabilité liée aux pénuries en eau. Il s'agit en particulier de déterminer les fragilités culturelles et institutionnelles du sociosystème, ainsi que ses capacités d'adaptation (comprises comme perspective d'action sur les dimensions physiques, économiques et sociales des pénuries en eau, Section 1.1.3). L'intérêt porte en somme sur les capacités et les stratégies de lutte contre les pénuries en eau. Dans ce cadre, il est intéressant de se pencher sur les représentations, les pratiques et les régulations sociales (Bertrand, et al., 2007 ; Rico et Guimelli, 2011).

Pour Jodelet « la représentation est « une forme de connaissance, socialement élaborée et partagée ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune à un ensemble social ». Elle est à la fois « le produit et le processus d'une activité mentale par laquelle un individu ou un groupe reconstitue le réel auquel il est confronté et lui attribue une signification spécifique » (Abric, 1994). Autrement dit, les représentations donnent un sens aux faits, tout comme les indices donnent un sens aux données (Section 1.1.3). Et de la même façon que les indices, les représentations contribuent à définir des périmètres d'actions et justifient les stratégies d'action (Moscovici, 1961, 2003). Dès lors, l'analyse des représentations présente un intérêt tout particulier pour la présente étude : elle offre des éléments de réflexion sur la dimension culturelle de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau et sur la façon dont elle impacte les stratégies d'action et donc l'adaptation. Ce faisant, elle ouvre le dialogue entre le

diagnostic expert fourni par l'IPE-SIG et le diagnostic profane fondé sur les représentations sociales. A ce stade il faut ajouter que les représentations varient dans un sociosystème donné : elles changent d'un individu ou d'un groupe à l'autre et évoluent en fonction des interactions qui sont autant d'expérience et de façonnement du réel.

Par définition, un sociosystème est constitué d'un ensemble d'éléments en interaction (Section 1.1.1). Les éléments sont de natures diverses (idéels, économiques, humains, etc.) de telle sorte que le sociosystème peut être abordé de différentes manières. Plusieurs d'entre elles s'intéressent spécifiquement aux personnes physiques ou morales qui sont en interaction dans le sociosystème ; elles sont alors appelées des acteurs, et forment des systèmes d'acteurs avec des domaines d'actions spécifiques (Crozier et Friedberg, 1977 ; Lemieux, 1991). Les acteurs mènent donc des actions individuelles qui entrent dans les domaines d'action collective : ce sont les pratiques d'acteurs. Au sein d'un système d'acteurs, les représentations (individuelles et collectives) se révèlent et se rencontrent alors dans les pratiques, lesquelles rétroagissent sur les représentations. Raffestin (2013) a aussi mis en évidence que des rapports de pouvoir régulent à la fois les pratiques et les représentations d'un système d'acteurs. Ce constat est la base de l'approche dite « relationnelle » (Blot, 2005).

En appliquant ce cadre analytique à l'étude de la vulnérabilité sociale, il apparaît que les capacités d'adaptation d'un sociosystème sont déterminées par des représentations, des pratiques, et des régulations sociales. En l'occurrence :

- ✓ l'étude des représentations permet d'aborder la dimension culturelle de la vulnérabilité ;
- ✓ l'étude des régulations sociales attirent notamment l'attention sur les fragilités institutionnelles, puisque les acteurs institutionnels concentrent (théoriquement) le pouvoir et ont la mission de réguler les pratiques ;
- ✓ l'étude conjointe des représentations, des pratiques et des régulations sociales apporte des éléments de réponse en ce qui concerne l'adaptation du sociosystème face aux pénuries en eau.

Pour rendre cette analyse opérationnelle et faciliter son dialogue avec l'IPE-SIG, les résultats sont synthétisés sous la forme d'une Analyse Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces (AFFOM). Cette approche a été développée pour rationaliser les stratégies d'action à de multiples échelles, et ce dans des domaines variés (Baba, et al., 2018 ; Damaris et al., 2010 ; Jackson, et al., 2003). Elles peuvent dès lors servir pour délimiter des périmètres d'action face aux pénuries en eau en fonction de la vulnérabilité et

des capacités d'adaptation des systèmes d'acteurs. Les AFFOM dressent – littéralement – un tableau des forces et des faiblesses du système considéré, en y incluant aussi les menaces et les opportunités qui se présentent à lui. Tandis que les forces et les faiblesses sont donc des caractéristiques internes du système, les menaces et les opportunités sont extérieures à lui, mais conditionnent son champ d'action. Hill et Westbrook (1974) nuancent l'intérêt de la méthode en démontrant que les AFFOM n'engendrent pas de projet et d'action concrète ; cela s'explique d'après eux car « *SWOT activity and its outputs do not constitute analysis at all, for they do not go beyond description, and description only in the most general terms*<sup>81</sup> ». Or dans le cas présent, l'AFFOM n'est pas employée dans une démarche analytique : il s'agit au contraire de synthétiser des analyses qualitatives et de favoriser les échanges entre les discours profanes et les discours d'experts. A ce sujet, Hill et Westbrook (1974) mentionnent qu'effectivement « *the most positive outcomes were simply the familiarization of the consultant with some company issues and/or the initiation of company personnel into a discussion process*<sup>82</sup> ». Cela confirme que l'AFFOM facilite les échanges et constitue une opportunité pour présenter les résultats d'analyses qualitative sous une forme appréciée des preneurs de décision. D'ailleurs, il faut noter que l'AFFOM est régulièrement employée au Mexique pour dresser des bilans dans le cadre de la production agricole (Carlos et Aguilar, 2014 ; Damaris et al., 2010 ; Produce, 2012 ; Reyes Vazquez et Urrea Lopez, 2016).

---

<sup>81</sup> « La pratique AFFOM et ses résultats ne constituent en rien une analyse, car ils ne vont pas au-delà de la description, et même de la description uniquement dans les termes les plus généraux ».

<sup>82</sup> « Les résultats les plus positifs ont simplement été la familiarisation de consultant avec certains problèmes de l'entreprise et / ou l'introduction du personnel de l'entreprise dans un processus de discussion ».

## Conclusions partielles

Cette première partie présente la vulnérabilité comme un objet d'étude polymorphe et difficile à appréhender dans toute son étendue et sa complexité dans les cadres disciplinaires (Section 1.1.2). Or face à des aléas socio-naturels reconnus et pressants, la demande de diagnostic de vulnérabilité est non seulement forte, mais aussi régie par les contraintes spécifiques de l'aide aux prises de décision. Il s'agit dès lors d'appliquer des méthodes d'analyse qui permettent d'intégrer les différents facteurs clés de la vulnérabilité, tout en générant des résultats synthétiques. Cette question se pose avec d'autant plus de force face à l'aléa singulier que sont les pénuries en eau (Section 1.1.3). Celles-ci présentent plusieurs dimensions (hydrologiques, économiques, sociales et mêmes infrastructurelles et environnementales), au sein desquels les entités sociales jouent un rôle central en déterminant notamment de fortes problématiques agricoles, rurales et environnementales (Section 1.1.1). Pour diagnostiquer les vulnérabilités associées aux pénuries en eau de telle sorte à aider les prises de décision, cette étude propose de partir des traditions de diagnostics préexistantes, même si cela implique d'affronter les défis de l'interdisciplinarité.

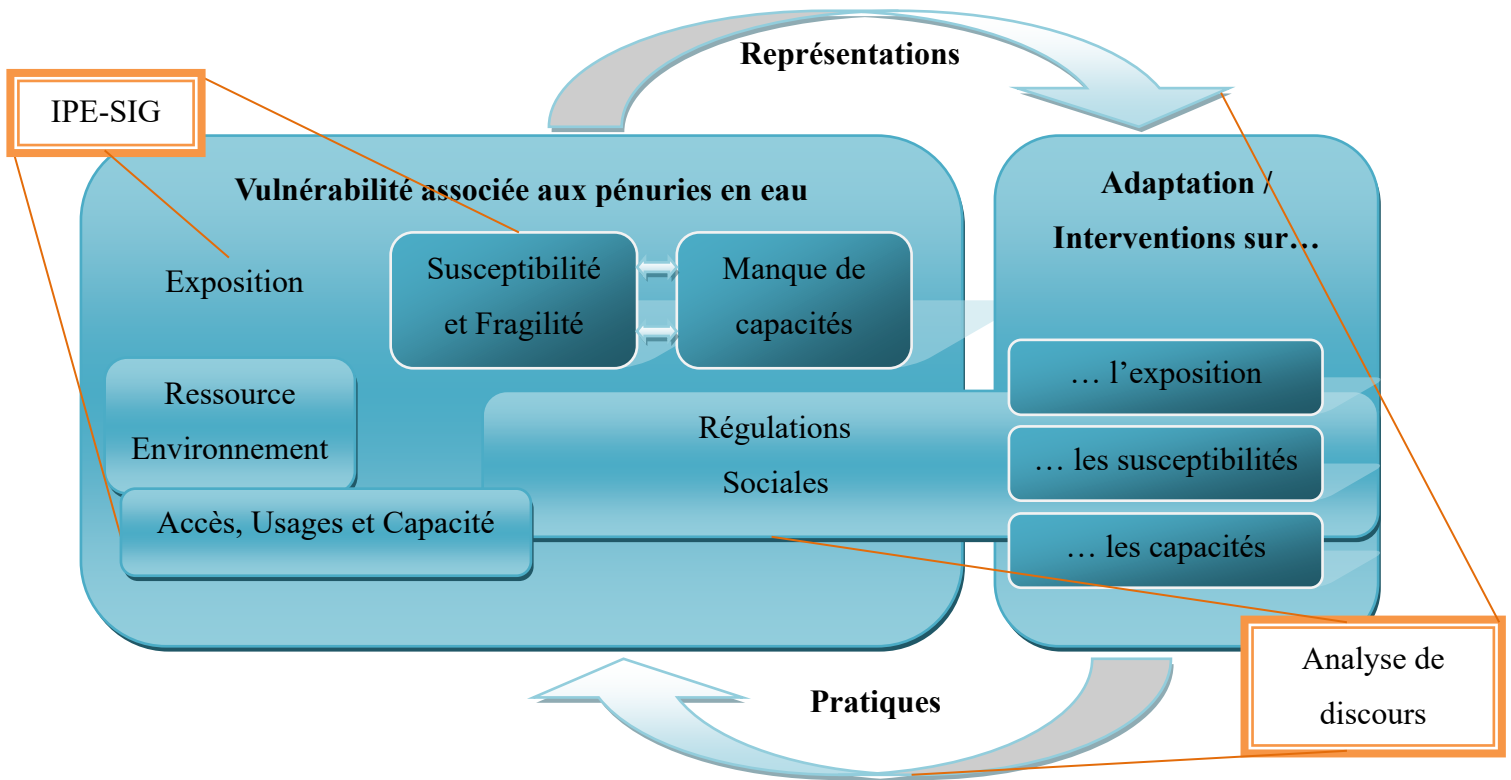
En l'occurrence, il se trouve que les indices sont élaborés à partir de données quantitatives afin d'agréger entre elles les différentes dimensions d'un problème (ou système complexe). En ce qui concerne les pénuries en eau, Sullivan et al. (2002) ont conçu un outil de diagnostic de cet ordre afin de favoriser la collaboration entre les scientifiques et les preneurs de décision (Section 1.2). L'IPE synthétise ainsi les données socio-économiques et éco-hydrologiques considérées comme significatives pour évaluer l'état de la disponibilité de la ressource sur un territoire donné. Cet outil a été appliqué à plusieurs échelles et sur plusieurs territoires de par le monde ; cela atteste de l'intérêt porté à cette focale analytique au Mexique notamment (Section 1.4.1). L'hypothèse est donc faite que l'IPE est pertinent pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau qui peuvent aider à la prise de décision à Chihuahua (Mexique).

Néanmoins la méthodologie de calcul de cet indice présente des faiblesses particulièrement limitantes pour une étude de vulnérabilité (Section 1.3). Certaines critiques concernent ainsi l'interdisciplinarité mais aussi l'IPE, et d'autres portent aussi sur la représentativité des résultats par rapport aux

problématiques agricoles et rurales. Or bien que l'analyse cartographique ne soit pas traditionnellement employée pour son calcul, il apparaît que l'IPE peut être appliqué à travers une EMC qui peut apporter des réponses à ces limites (Sections 1.4.2 et 1.4.3). Plusieurs sous-objectifs sont donc formulés pour exploiter les alternatives ouvertes par les outils SIG en termes d'opérations statistiques, de bases de données et d'unités de calcul.

L'IPE-SIG ainsi obtenu offre une approche interdisciplinaire intéressante en ce qui concerne l'exposition mais aussi en ce qui concerne certaines fragilités de la société : la pauvreté entrant simultanément dans les facteurs de pénuries et dans ceux de vulnérabilité (Sections 1.1 et 1.4.3). Néanmoins, un tel diagnostic reste incomplet relativement aux dimensions sociales de la vulnérabilité. En outre, il ne dit rien des capacités d'adaptation, lesquelles impactent l'exposition aux pénuries en eau avec force (puisque le sociosystème les déterminent à la fois directement et indirectement). Pour interroger les capacités sociales et les périmètres d'action, l'approche relationnelle suggère d'étudier conjointement les représentations, les pratiques et les régulations sociales qui s'expriment dans les systèmes d'acteurs. Voilà pourquoi un dernier sous-objectif a été considéré pour compléter l'IPE-SIG par une analyse des discours et intégrer de cette manière les dimensions sociales de la vulnérabilité dans le diagnostic.

Elaborer un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau à partir de l'IPE, implique donc de naviguer entre des concepts qui se ressemblent et se complètent. De plus, cet objectif pousse à associer des méthodes distinctes, et à faire dialoguer des approches qui sont parfois fondamentalement différentes mais aussi complémentaires. La Figure 7 illustre la démarche interdisciplinaire qui est adoptée dans la présente étude.



**Figure 7: Composantes (bleues) et outils (oranges) d'analyse de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau**

Le cadre analytique ainsi élaboré est complexe, et (par extension) délicat à appliquer. Mais de tels défis doivent être relevés pour générer des diagnostics opérationnels face à des systèmes complexes. En l'occurrence, l'analyse est appliquée à un niveau que Birkmann et al. (2013) appellent « subnational », mais elle considère plusieurs échelles :

- ✓ l'IPE-SIG est calculé en croisant les échelles administratives (municipales), avec des échelles associées à l'observation des dynamiques environnementales ;
- ✓ l'analyse de discours est pour sa part menée à une échelle locale (elle s'intéresse à des systèmes d'acteurs couvrant quelques municipalités seulement).

Pour faire dialoguer ces deux analyses entre elles, les résultats sont synthétisés dans une approche AFFOM appliquée à l'échelle locale. Les similitudes et les nuances observées à ce niveau ont vocation à enrichir la réflexion sur la construction de diagnostics interdisciplinaires, mais aussi et surtout à associer les différents facteurs de vulnérabilité dans un support qui puisse aider la prise de décision.



**Partie 2 : Approches croisées de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau  
dans l'état de Chihuahua : cartographier la pauvreté en eau et analyser les  
discours d'acteurs**

## **2.1 Des dégradations de la ressource à la pénurie en eau : vulnérabilité, usages et gestion de l'eau dans l'Etat de Chihuahua**

L'IPE est construit pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau pour l'Etat de Chihuahua. La configuration contrastée de cet Etat présente deux intérêt dans cette étude : d'une part il est intéressant d'observer comment l'IPE peut refléter sa diversité, et d'autre part l'élaboration de diagnostic pour l'aide à la prise de décision y est particulièrement bienvenue sur ce territoire qui pose plusieurs questions du point de vue de la gestion de l'eau. A ce sujet, il faut signaler que cette étude s'inscrit dans le cadre d'une gestion préexistante et qui emploie des méthodes modernes (Section 1.2.3). Dès lors, les bases de données publiques portant sur les pénuries en eau sont nombreuses à Chihuahua et plus généralement au Mexique. Néanmoins le diagnostic est établi dans un esprit de synthèse : l'objectif n'est pas de créer de surprise (1.2), mais de donner sa place aux diverses dimensions de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau.

Dans ce cadre, les sous-objectifs concernant le renforcement de l'interdisciplinarité du diagnostic sont d'autant plus importants. Afin d'y répondre, plusieurs méthodes sont employées pour calculer l'IPE dans l'ensemble des municipalités de l'Etat de Chihuahua. En complément de ce premier diagnostic, l'analyse de discours aborde la question des vulnérabilités sociales, qui sont peu traitées dans cet Etat. En l'occurrence l'étude se centre sur la région agricole de Delicias qui concentrent de forts enjeux de production, mais aussi des défis du point de vue environnemental et géopolitique.

### *2.1.1 Dégradations de la ressource et enjeux de gestion dans l'Etat de Chihuahua : quand les espaces arides sont productifs*

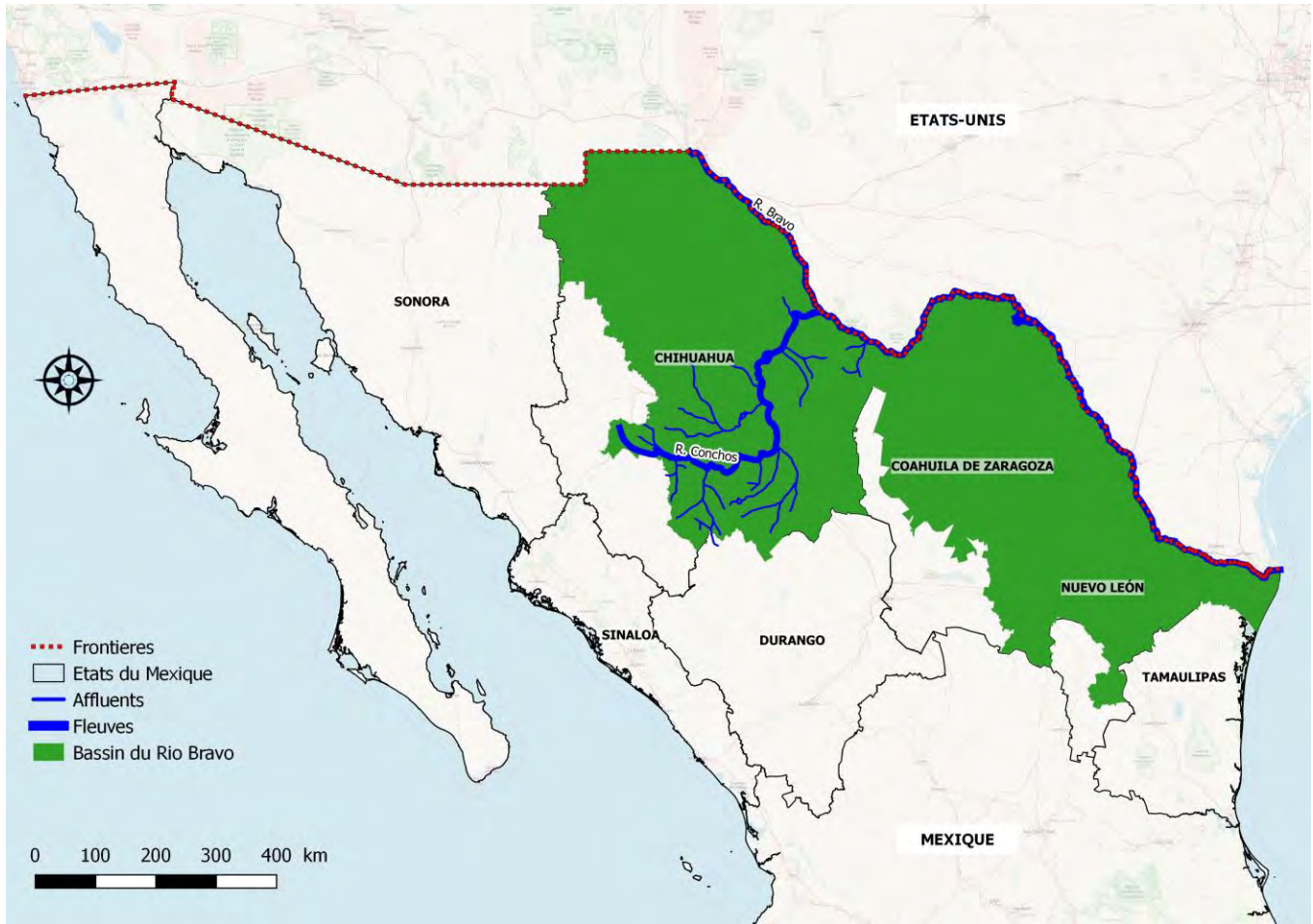
Avec un territoire de 247 455 km<sup>2</sup>, Chihuahua est le plus grand des états mexicains. Néanmoins sa géographie singulière en fait un Etat relativement peu peuplé, avec 3,67 millions d'habitants (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a). Il en résulte une disponibilité en eau de 3 242m<sup>3</sup>/hab/an ainsi qu'une productivité notable (Secretaria de Desarrollo Rural, 2017). Cependant, des contrastes existent tant dans les écosystèmes que dans les sociosystèmes qui le composent ; et plusieurs facteurs de pénuries

en eau cohabitent dans cet Etat. Cela le rend particulièrement intéressant pour appliquer l'IPE et discuter ses résultats.

- Problématiques quantitatives et qualitatives associées aux ressources en eau à Chihuahua

L'Etat de Chihuahua est formé par deux ensembles géographiques distincts : la Sierra Madre Occidental située au sud et à l'est de l'état (elle prend le nom de Sierra *chihuahuense*), et le désert dit *chihuahuense* au nord et à l'est, dont l'aridité culmine dans les dunes de la réserve protégée de Samalyuca à l'extrémité nord de l'Etat (Schmidt et Marston, 1981).

Le territoire *estatal* est de fait caractérisé par un climat aride et semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes de 427 mm/an, mais il présente de forts contrastes territoriaux puisque certaines régions reçoivent 290 mm/an de précipitations tandis que d'autres en reçoivent jusqu'à 726 mm/an (Gobierno del Estado, 2017). Dans ce contexte, les eaux de surfaces jouent un rôle structurant pour le territoire. En dehors de la Sierra, l'Etat de Chihuahua appartient à la région hydro-administrative correspondant au bassin du Rio Bravo (Section 2.5.1). Il compte deux principaux fleuves (Carte 3) : le Rio Bravo au nord, qui fait office de frontière entre le Mexique et les USA et va se jeter dans le golf du Mexique et son affluent le Rio Conchos qui trouve sa source dans la montagne, traverse le désert vers le nord. Ce système hydrographique au comportement hydrologique excessif étant régulièrement affecté par des sécheresses sévères et prolongées (Reyes-Gómez et al., 2006), deux grands barrages ont été aménagés dans le sud de l'état pour le réguler et valoriser la ressource hydrique à travers des activités agricoles (Section 2.1.2). Néanmoins, il semble que les dynamiques de changements climatiques affectent tout particulièrement cette région qui voit se multiplier les épisodes de sécheresse (Reyes-gómez, 2006 ; SEMARNAT-CONAGUA, 2015).



**Carte 3: Les fleuves de Chihuahua appartenant au bassin du Rio Bravo (CONABIO, 2012)**

En ce qui concerne les eaux souterraines, dans l'Etat de Chihuahua, on dénombre 61 aquifères. Ces aquifères présentent une grande diversité mais sont majoritairement des aquifères libres ou semi-confinés, formés principalement dans les sédiments du Tertiaire et Quaternaire, la recharge se fait essentiellement par des courants superficiels au sein des vallées. Si toutefois les matériaux du Quaternaire perméables donnent naissance à des aquifères à hauts rendements, du fait de la localisation en région désertique la circulation des écoulements est lente et favorise la mise en suspension d'arsenic présent dans les roches de la Sierra Madre Occidental (arsenopirita). La mise en suspension d'arsenic est favorisée par le géothermalisme et l'exploitation minière et peut présenter des teneurs supérieures au

seuil limite pour la consommation humaine de 0,025 µg/l<sup>83</sup>. Concernant ces aquifères, la Secretaría de Desarrollo Rural (2017) établit un autre constat inquiétant « *las aguas subterráneas se están agotando, de los 61 acuíferos en la entidad, 19 se encuentran sobre explotados (31%), cuarenta de ellos se encuentran sin disponibilidad*<sup>84</sup> ». La problématique est d’autant plus pressante qu’elle s’est renforcée depuis 2011, année pour laquelle 14 aquifères présentaient déjà des conditions de surexploitation (Gobierno del Estado, 2011). Cette surexploitation est principalement dûe aux pratiques agricoles : « *Los datos demuestran que el sector agrícola tiene la mayor oportunidad de aumentar la eficiencia y productividad en el uso de agua. El 89 por ciento del agua en Chihuahua es utilizada para riego, y la actividad agrícola produce el 6.2 por ciento del PIB estatal. Se cuenta con una superficie total de riego de 314 mil 87 hectáreas, que comprende una superficie física total de 168 mil 860 hectáreas en ocho distritos de riego, además de las unidades implementadas para el mismo fin. Aquí hay que señalar que el 60 por ciento de los recursos hidráulicos son exportados a Sonora, Sinaloa y Estados Unidos*<sup>85</sup> » (Secretaria de Desarrollo Rural, 2017). La part de l’agriculture dans les prélèvements d’eau est donc considérable et soulève des interrogations d’autant plus fortes que l’hydrosystème de la Sierra *chihuahuense* approvisionne en eau plusieurs territoires non seulement à l’intérieur mais aussi à l’extérieur de l’Etat. La gestion de ces ressources s’érige en somme comme un défi étant donné les multiples intérêts qui sont en jeux.

A cela viennent aussi s’ajouter des problématiques de dégradations qualitatives de la ressource : « *La contaminación del agua es otro agravante más para el cuidado del Medio Ambiente, según la Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua un habitante de una zona urbana de Chihuahua consume en promedio 310 litros de agua de la cual muy poca se recupera, en el año 2015 se contaba con la operación de 170 plantas tratadoras de agua en el Estado con una capacidad instalada de 9,395 litros*

---

<sup>83</sup> Dans la région d’étude concernant le système d’acteurs, les aquifères concernés sont les DR\_0840 Acuífero Villalba et DR\_0831 Méoqui-Délicias. Dans ce dernier la présence d’arsenic a été évaluée et il a été montré que le seuil officiel était dépassé dans 72 % des mesures effectuées (Espino-Valdés et al., 2009).

<sup>84</sup> « Les eaux souterraines sont en voie d’épuisement, des 61 aquifères de l’entité, 19 sont surexploités (31%), et 40 d’entre eux se trouvent au point d’équilibre ». (Diario Oficial de la Federación (DOF) el 4 enero de 2018).

<sup>85</sup> « Les données démontrent que le secteur agricole présente la plus grande opportunité d’augmenter son efficacité et sa productivité par rapport à l’usage de l’eau. 89% de l’eau à Chihuahua sont utilisés pour l’irrigation, et l’activité agricole produit 6,2% du PIB de l’Etat. On compte 8 districts d’irrigation, en plus des unités développées avec la même finalité. Il faut signaler que 60 % des ressources hydriques sont exportées vers Sonora, Sinaloa et les Etats-Unis. »

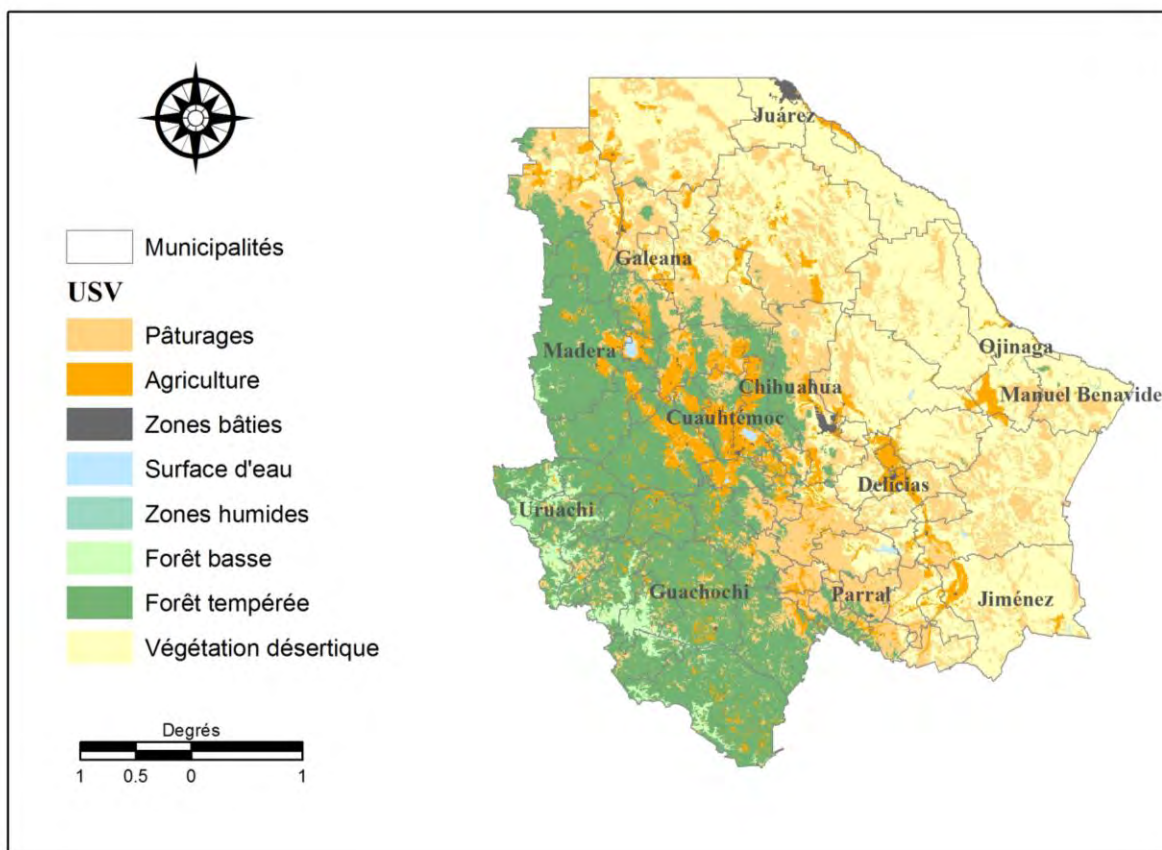
*por segundo, es importante la recuperación de dicha agua sin embargo es aún más importante la cultura del ahorro y el cuidado no solo del agua sino del Medio Ambiente*<sup>86</sup> ». Les difficultés associées aux traitements de l'eau résiduelle font écho à la surexploitation massive des aquifères en ce qu'elles mettent en évidence les limites relatives à la consommation de l'eau de cet état qui est traditionnellement présenté comme un exemple de réussite, notamment économique, au Mexique.

- Une productivité forte mais localisée au milieu de territoires plus marginalisés

L'immense extension géographique de l'Etat de Chihuahua lui confère de richesses notamment minières et agricoles. En 2013, il était d'ailleurs le premier Etat à l'échelle nationale concernant les productions d'avoine pour le fourrage, de coton (dit *algodón hueso*), d'oignons, de luzerne verte, de pommes et de noix (INEGI, 2014b). Et la même année, il était le second pour la production de bois (notamment le pin) mais aussi pour celle de l'or, l'argent, le zinc, et le plomb (INEGI, 2014b). Les enjeux miniers sont répartis sur le territoire, tandis que la population et les activités primaires se concentrent à l'interface des territoires désertiques et montagneux (Carte 4).

---

<sup>86</sup> « La contamination de l'eau est un facteur aggravant de plus en ce qui concerne la prise en compte de l'environnemental, d'après l'Assemblée Centrale de l'Eau et de l'Assainissement de Chihuahua, un habitant vivant en zone urbaine à Chihuahua consomme en moyenne 310 litres d'eau, et très peu sont ensuite récupérés, en 2015 on comptait 170 stations d'épurations dans l'Etat avec une capacité installée de 9 395 l/s, il est important de récupérer cette eau cependant la culture de la préservation (économie et soin) non seulement de la ressource mais aussi de l'environnement est encore plus importante. »



Carte 4: Usage des sols et de la végétation à Chihuahua de 2012 (adapté de CONABIO, 2012)

Le centre de l'Etat est caractérisé par une forte concentration des activités agricoles et de l'urbanisation, avec trois villes de plus de 100 000 habitants (Chihuahua, Delicias et Cuauhtémoc). En périphérie de la ville de Delicias se situe le *Distrito de Riego 005*<sup>87</sup> (DR 005) de Delicias (présenté dans la Section 2.1.2) et la région agricole de Cuauhtémoc qui est caractérisée par la production de pommes et l'utilisation de systèmes d'irrigation technicisés (Secretaria de Desarrollo Rural, 2017 ; SEMARNAT-CONAGUA, 2010). La ville frontalière de Juárez, également entourée par des territoires agricoles (avec le DR 009 de Valle de Juarez au sud-est) mais aussi des activités minières, est quant à elle la plus grande ville de l'Etat de Chihuahua. Enfin, même si les centres urbains que constituent Ojinaga et Jiménez sont de moindre importance du point de vue démographique, le DR 090 Bajo Rio Conchos (à Ojinaga) et le DR 103 Rio Florido (qui s'étend au sud-ouest de Jiménez) en font aussi des pôles de développement

<sup>87</sup> « District d'irrigation 005 »

agricole notables (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a). La production de noix de pécan à Jiménez en fait en particulier une municipalité notable à l'échelle nationale (Reyes Vazquez et Urrea Lopez, 2016).

Pour sa part, l'activité minière est présente sur une grande partie du territoire de Chihuahua et va de pair avec les pôles urbains déjà mentionnés (Secretaria de Economia, 2016). Mais dans le sud-ouest de l'état, elle acquiert une dimension structurante supplémentaire. Ainsi, le centre urbain de Parral constitue-t-il une plateforme historique dans le cadre de ces régions minières (Secretaria de Economia, 2016). Et à leur manière les villes de Madera, Guachochi ou San Juanito (situées au nord de Guachochi) représentent des postes avancés menant vers les différentes mines qui se trouvent au cœur de la Sierra. Tous ces pôles urbains et économiques plus ou moins importants, restent néanmoins relativement ponctuels au milieu de territoires qui n'entrent pas dans les dynamiques socio-économiques qui viennent d'être décrites.

Le nord-est de l'Etat se caractérise par une présence humaine particulièrement éparse, due au contexte désertique de ce territoire (CONABIO, 2012). En conséquence, les dynamiques hydro-climatologique y sont prédominantes et finissent par cacher certains enjeux sociaux, essentiellement de l'ordre de la marginalisation et de la désertification (Arreguin Cortés, 2015 ; Quintana S., 2009). Quant à la Sierra *chihuahuense*, elle héberge des populations dites indigènes et présente une forte marginalisation respectivement aux processus de développement (CONAPO, 2010 ; Secretaria de Desarrollo Rural, 2017). L'urbanisation y est faible, les activités minières éparse, et en dehors du DR 083 Papigochic (situé à Madera, à l'extrémité nord de la Sierra), l'agriculture est saisonnière (CONABIO, 2012). La Sierra concentre finalement les expressions multidimensionnelles de la pauvreté, avec une force légèrement plus notable dans le sud de ce territoire que dans le centre et dans le nord (Arreguin Cortés et al., 2015 ; SEMARNAT-CONAGUA, 2015). Ces problèmes qui vont jusqu'à l'insécurité, constituent un autre défi au niveau *estatal* (Gobierno del Estado, 2017).

- Trois entités territoriales qui se distinguent par différentes situations de ressource et d'accès à l'eau

En somme, les pôles de développement jouent un rôle structurant au milieu de la Sierra et du désert *chihuahuenses*, dont les dynamiques économiques et démographiques bien plus restreintes (Gutiérrez C,



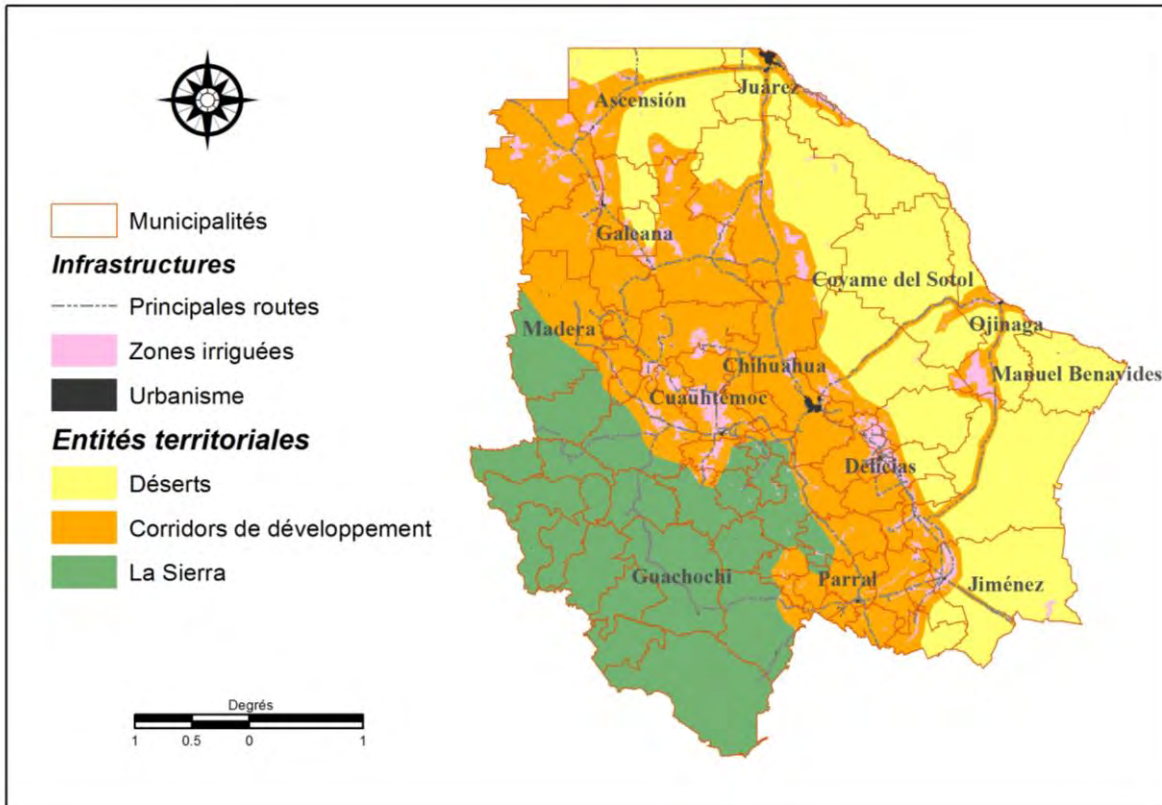
2007 ; Meza Moreno, 2012). A ce sujet, il faut signaler que dans les territoires désertiques de l'Etat de Chihuahua, les centres urbains concentrent la majeure partie de la population, mais que dans la Sierra les pôles existants sont de moindre importance (INEGI, 2010a) :

- ✓ à Cuauhtémoc 80 % de la population vit dans deux villes qui comptent plus de 5 000 habitants ;
- ✓ à Manuel Benavides 57 % des 1 601 habitants vivent dans le chef-lieu communal (qui compte 916 habitants) ;
- ✓ alors qu'à Guachochi, le chef-lieu communal (qui compte 14 513 habitants) concentre seulement 30 % de la population.

Outre les différences écologiques qui caractérisent les deux ensembles de la Sierra (identifié comme « La Sierra » sur la carte 5) et du désert *chihuahuenses*, il apparaît que des différences démographiques et sociales les distinguent aussi. En parallèle, les facteurs sociaux distinguent aussi deux ensembles au sein des milieux désertiques (Arreguin Cortés, et al., 2015 ; INEGI, 2015) : l'un peuplé, inscrit dans les dynamiques de développement (identifié comme « Corridors de développement » sur la carte 5), et structuré autour des territoires agricoles ; et l'autre marginalisé par des dynamiques de désertification (identifié comme « Désert » sur la carte 5). Dès lors, trois entités territoriales se dessinent et se caractérisent par trois situations de ressources en eau :

- ✓ « la Sierra » : pourvue en eau ;
- ✓ les « Corridors de développement » : zones désertiques aménagées ;
- ✓ le « Desert » : dépourvue de ressource.

Les différences hydroclimatiques de ces territoires et les réalités économiques impactent les municipalités de différentes façons.



Carte 5 : Délimitation des trois ensembles géographiques de l'Etat de Chihuahua, (adapté de CONABIO, 2012)

La Carte 5 (ci-dessus) délimite trois ensembles géographiques en fonction des différentes dimensions impactant l'accès à la ressource en eau tout en faisant apparaître les unités de gestions territoriales essentielles que sont les municipalités (Section 2.4.2). Tandis que le territoire municipal de Jiménez est quantitativement peu impacté par les corridors de développement, son économie affirme son appartenance aux corridors de développement<sup>88</sup>. Outre la région centrale qui s'étend depuis Cuauhtémoc jusqu'à Jiménez, la carte inclue dans les corridors de développement les villes de Juárez et Ojinaga ainsi que les DR qui les environnent. Plusieurs territoires du nord-ouest de l'état y sont aussi inclus : ils couvrent les extensions agricoles de la municipalité Ascension dont le dynamisme est notable (Secretaria de Desarrollo Rural, 2017), ainsi que trois DR :

- ✓ le DR 042 de Buenaventura ;

<sup>88</sup> La mise en exergue de cette dimension donne lieu à une autre représentation de la délimitation des entités territoriales mentionnées ici, laquelle est présentée en Annexe 1 et sert de support dans la présentation des résultats (Sections 3.1, 3.2 et 3.3).

- ✓ le DR 089 El Carmen ;
- ✓ le DR 083 Papigochic.

Au sud de l'Etat, Parral et quelques municipalités minières sont aussi incluses dans cette entité dont le point fort est le développement, et les points faibles sont a priori d'ordre environnementaux, avec notamment une surexploitation massive des aquifères (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a). Il faut d'ailleurs noter que la majeure partie de ces corridors présente des caractéristiques semi-arides (exception faite de la région située entre Madera et Cuauhtémoc, et des alentours de Parral). La Sierra présente une situation complètement différente puisqu'elle est favorisée par le climat, relativement préservée du point de vue environnemental, mais affectée par une forte pauvreté d'ordre socio-économique (Arreguin Cortés et al., 2015). Enfin, les territoires de déserts associent des problèmes hydro-climatologiques et socio-économiques. En l'occurrence, trois municipalités concentrent tout particulièrement ces trois types de difficultés, à savoir Galaena, Coyme del sotol et Manuel Benavides (Arreguin Cortés et al., 2015 ; Gutiérrez C, 2007 ; Meza Moreno, 2012).

Parallèlement à ces contrastes territoriaux, il faut signaler que les espaces ruraux de l'Etat de Chihuahua présentent des défis communs. Cela apparaît, bien que légèrement, en ce qui concerne l'accès aux services d'eau potable : « *la cobertura de agua potable en población urbana del estado de Chihuahua al 2012 reportó un 98.3 por ciento, mientras que en la población rural alcanzó el 73.6 por ciento*<sup>89</sup> » (Gobierno del Estado, 2017). Mais un autre constat, plus marquant encore, indique un manque d'opportunité ; d'après Secretaria de Desarrollo Rural (2017) « *el campo chihuahuense se encuentra en una constante dinámica de reacomodo social, en los últimos años se ha presentado un decremento en la población rural de alrededor del 5 por ciento en diversos municipios de la entidad, resultado del fenómeno migratorio de las comunidades rurales hacia los centros urbanos, migración interestatal y al extranjero, debido a factores como el desempleo y las expectativas de crecimiento*<sup>90</sup>. » Ces tendances invitent à regarder à observer la vulnérabilité sociale à des échelles plus fines.

---

<sup>89</sup> « La couverture en eau potable pour les populations urbaines de l'Etat de Chihuahua était en 2012 de 98,3 pourcents, alors que pour les populations rurales elle était de 73,6 pourcent. »

<sup>90</sup> « La campagne *chihuahuense* se trouve dans une constante dynamique de réacomodement social, au cours des dernières années la population rurale a diminué d'environ 5 pourcent dans diverses municipalités de l'entité, résultant du phénomène migratoire des communautés rurales vers les centres urbains, des migrations *interestatales* et vers l'étranger, ceci étant dû à des facteurs comme le chômage et les attentes liées à la croissance. »

### 2.1.2 *Gestion de l'eau et systèmes d'acteurs dans les municipalités agricoles de Delicias, Julimes, Meoqui et Rosales (État de Chihuahua)*

La vallée du *Río Conchos* approvisionne deux ensembles agricoles côté mexicain avant de rejoindre le *Río Bravo* (Section 2.1.1). Cette section donne à voir que l'hydrosystème correspondant joue un rôle important notamment pour les pôles de développement urbains et agricoles que forme la sous-région de Delicias, mais aussi à plus grande échelle puisqu'il est concerné par les traités internationaux existant entre les USA et le Mexique. Or, ce territoire concentre plusieurs facteurs physiques de pénuries en eau qui font de la gestion de l'eau une entreprise importante mais difficile. Dans ce contexte, l'analyse des vulnérabilités sociales du sociosystème est d'autant plus pertinente que les enjeux de la gestion de l'eau sont multiples.

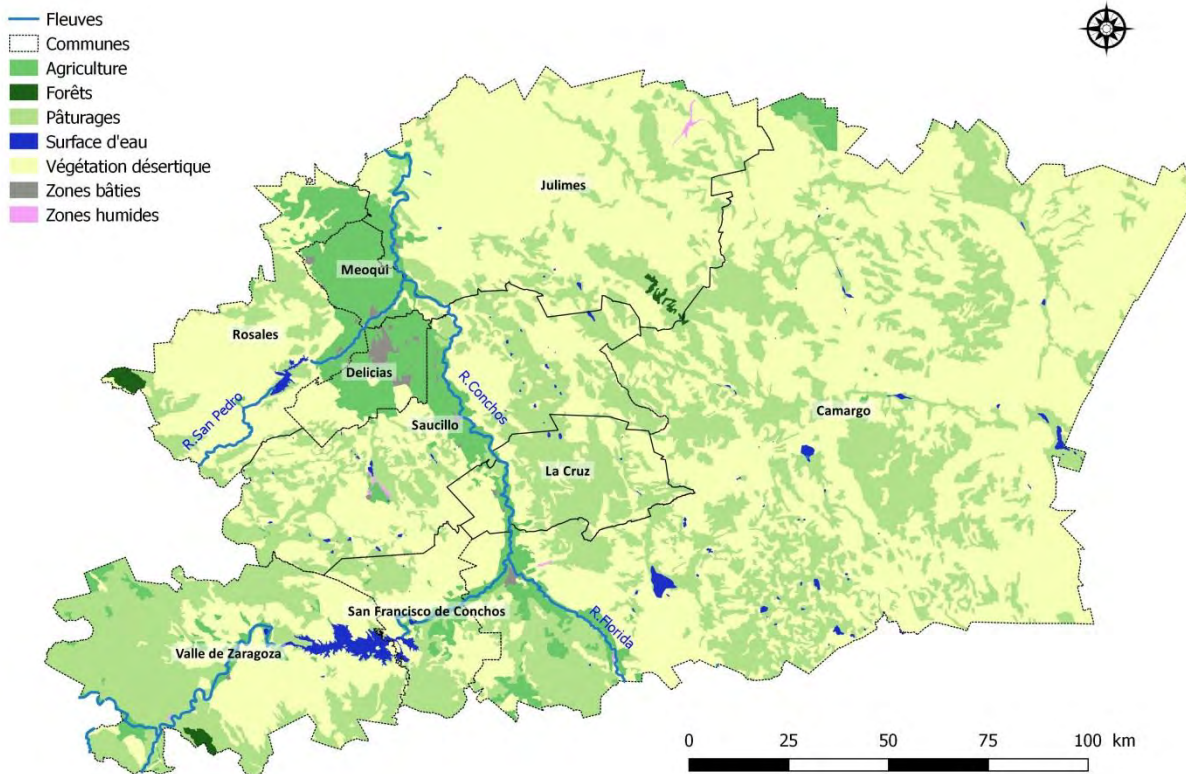
- Rencontre des dynamiques locales, nationales et globales dans la sous-région de Delicias

A l'entrée des villes de Delicias et Meoquí apparaît la devise « *Vencedores del desierto*<sup>91</sup> » évoquant que le statut de pôles de développement y a été durement acquis dans un climat hostile (Section 2.1.1). C'est pourquoi la zone d'étude considérée pour l'analyse qualitative s'intéresse aux deux municipalités correspondantes, ainsi qu'à leurs voisines Julimes, Rosales et Saucillo, compagnes de sort de Delicias et Meoquí d'après la *Secretaría de Desarrollo Rural*<sup>92</sup> (2017). La sous-région ainsi définie est alimentée en eau par deux cours d'eau pérennes qui descendent de la sierra : le *Conchos*, et son affluent le *San Pedro* (Carte). L'hydro-sociosystème est marqué par la présence de deux barrages : la *Boquilla* située sur le *Conchos*, et *Francisco I. Madero* situé sur le *San Pedro*. Ces barrages ont été construits pour contrôler dans la mesure du possible des réserves en eau fluctuantes et convoitées.

---

<sup>91</sup> « Vainqueurs du désert »

<sup>92</sup> « Ministère du Développement Rural »



**Carte 6: La sous-région de Delicias**

Etant donné que le *Conchos* est le principal affluent du *Río Bravo* côté mexicain ce cours d'eau acquiert un statut particulier dans le cadre de l'hydrosystème transfrontalier (Carte 3, Section 2.1.1). De fait, en 1944 un *Tratado Internacional de Límites y Aguas*<sup>93</sup> (TILA) a été adopté entre le Mexique et les USA (Estados Unidos Mexicanos, 1944). Il y est établi que :

- ✓ Les USA livrent une partie de l'eau du *Colorado* au Mexique et en échange ;
- ✓ Dans le cas du *Río Bravo* « *En este tratado se especifica que México debe aportar 2 156 hm<sup>3</sup> en ciclos de cinco años, es decir, un promedio de 432 hm<sup>3</sup> [por año]* <sup>94</sup> » (CONAGUA, 2001).

Un organisme international, la *Comisión Internacional de Límites y Aguas* a été mis en place afin d'adapter la gestion de l'eau à ce contexte particulier (Alvarez Andrade, 2010 ; CONAGUA, 2014a).

<sup>93</sup> « *Traité International des Limites et des Eaux* »

<sup>94</sup> « *Dans ce traité il est précisé que le Mexique doit apporter 2 156 hm<sup>3</sup> sur des cycles de cinq ans, soit en moyenne 432 hm<sup>3</sup> [par an]* ».

Néanmoins au Mexique des problèmes de partages administratifs et légaux associés à la gestion de l'hydrosystème des Río *Conchos-Bravo* ont pris de l'ampleur pour se convertir en tension entre les deux pays, et même en conflits qui affectent le gouvernement *estatal* (de Chihuahua) et le gouvernement fédéral (mexicain), mais aussi les usagers et les institutions locales (Angélique-Descamps et Alarcón-Herrera, 2015 ; Parr Rosson, et al., 2003). Il faut dire à ce sujet que l'entreprise de concilier tous les intérêts portant sur ces cours d'eau est d'autant plus compliquée que des épisodes de sécheresses sévères et prolongées ont affecté l'ensemble des territoires transfrontaliers Mexique/USA au cours des dernières années (SEMARNAT, 2011; Wilder et al., 2013).

Localement, la sous-région de Delicias est caractérisée par une forte présence de l'agriculture, dont la production génère plus de 4 600 millions de pesos mexicains (Secretaría de Desarrollo Rural, 2017). Dans le contexte semi-aride qui caractérise ce territoire, le secteur primaire repose en quasi-totalité sur la pratique de l'irrigation. En l'occurrence, la zone d'étude comprend le plus grand *Distrito de Riego*<sup>95</sup>(DR) de l'Etat (présenté dans le point ci-dessous) mais il compte aussi plusieurs *Unidades de Riego*<sup>96</sup> (UR) (dont les structures et les dynamiques sont commentées dans les Section 2.5.1 et 3.4) (CONAGUA, 2015e; SEMARNAT-CONAGUA, 2015b). Mais cette grande productivité agricole induit de fortes demandes en eau qui ne peuvent pas toujours être satisfaites. Pour faire référence à cette problématique qui touche plusieurs territoires au sein du Mexique, la littérature spécialisée parle du surdimensionnement des structures agricoles (CONAGUA, 2001 ; SAGARPA, 2005). Dans le cadre de la région d'étude, outre les tensions générées aux niveaux locaux et internationaux, ces enjeux agricoles occasionnent aussi une surexploitation systématique des aquifères (CONAGUA, 2015a). Les *Zonas de Veda*<sup>97</sup> qui déterminent un cadre légal pour empêcher la mise en place de nouvelles extractions souterraines ne sont pas suffisantes pour réapprovisionner les nappes phréatiques (Angélique-Descamps et Alarcón-Herrera, 2015).

En parallèle, l'essor agricole a aussi engendré la croissance de la ville de Delicias : avec 114 007 habitants elle est la troisième ville de l'état en terme de population (INEGI, 2010a). A côté, la ville de Meoquí, voisine de Delicias, fait figure de petite ville avec ses 22 574 habitants. L'approvisionnement

---

<sup>95</sup> « District d'Irrigation »

<sup>96</sup> « Unités d'Irrigation »

<sup>97</sup> Il n'existe pas de traduction littérale pour la formule *Zona de Veda* : elle fait référence à l'interdiction légale de créer de nouvelles extractions d'eaux souterraines (Estados Unidos Mexicanos, 2011).

en eau de ces populations pose notamment question car de fortes contaminations d'arsenic ont été mises en évidence dans les réserves d'eaux souterraines de la sous-région (Espino-Valdés, et al., 2009 ; Pineda, 2016). Dans ce contexte, des stations de potabilisation comptant sur des processus d'osmose inverse sont mises en place, mais les eaux résiduelles de ces stations de traitement rejoignent ensuite les autres eaux usées et suscitent une contamination inquiétante (Olmos Marquez et Alarcón-Herrera, 2014). Enfin, si les municipalités qui forment la région d'étude présentent des taux de connexion aux services d'assainissement supérieurs à 90%, il faut remarquer que le traitement des eaux usées y est en revanche limité (CONAGUA et SEMARNAT, 2015 ; INEGI, 2010b).

En somme, la sous-région de Delicias constitue un pôle de développement urbain et agricole qui semble néanmoins exposé à des dégradations physiques de la ressource ainsi qu'à des facteurs de vulnérabilité sociale. Dans ce contexte, la présence du plus grand DR de l'Etat est notable.

- Présentation du DR 005 : une grande infrastructure d'irrigation dans un contexte semi-aride et frontalier

Les DR émergent en 1936 sous l'initiative du gouvernement mexicain : certains d'entre eux ont été fondés à partir de ressources privées, tandis que d'autres ont été créés grâce à des fonds publics qui ont permis de développer de nouvelles infrastructures pour l'irrigation (Viqueira Palerm, 2006). En l'occurrence, le DR 005 de Delicias a été créé à partir de fonds publics qui ont notamment été employés dans la construction du barrage de Francisco I. Madero (inauguré en 1949 avec une capacité utile de 296 hm<sup>3</sup>) (CONAGUA, 2010a). Mais il est aussi approvisionné en eau par le barrage La Boquilla qui est antérieur au DR (inauguré en 1916 avec une capacité utile de 2 894 hm<sup>3</sup>).

Ces barrages alimentent en eau la plus grande structure agricole de l'Etat de Chihuahua, à savoir le DR005 qui réunit 8108 usagers qui irriguent 54 096 ha avec une concession équivalent à 707 724,3 millier de m<sup>3</sup> d'eau (SEMARNAT-CONAGUA, 2015b). La culture principale y est la luzerne (21 572 ha), puis viennent les noyers (8 302 ha), les cacahuètes (6 645 ha) et le maïs fourragers (5 047 ha). Le DR 005 compte aussi d'importantes extensions de piments verts, de coton et de pastèques (environ 3 000 ha chacun) et enfin près de 2 000 ha d'oignon. Dans ce contexte, la prédominance de la luzerne et des maïs fourragers s'explique par les pratiques d'élevages qui caractérisent aussi la région, tandis que les autres cultures (comme la noix, et les cultures maraîchères) sont destinées à l'exportation nationale, ou internationale (Section 3.4.2).

Le statut de de DR implique une structure administrative spécifique (Section 2.5.1). En l'occurrence, le DR 005 est organisé en 10 modules qui sont répartis au sein de deux *Sociedades de Responsabilidad Limitada*<sup>98</sup> (SRL) dont les fonctions sont définies dans la Section 2.5.1 :

- ✓ La Société Conchos qui s'occupe du canal du même nom, alimenté par la Boquilla ;
- ✓ La San Pedro (qui fait l'objet de la présente étude) en charge du canal San Pedro essentiellement alimenté par le barrage Francisco I. Madero.

Initialement l'ensemble de ces infrastructures hydrauliques étaient administrées, opérées et entretenues par les représentants du pouvoir fédéral (Olvera-Salgado, et al., 2014 ; Olvera-Salgado, et al., 2014). Comme dans le cas des autres DR du pays, même si les usagers payaient pour cela un quota pour ces services la gestion de telles infrastructures exigeaient de fortes subventions ainsi que des investissements de la part du pouvoir fédéral. C'est pourquoi un programme de transfert des DR a été mis en place en 1989<sup>99</sup>: la CNA se réserve le contrôle, la maintenance et l'opération des ouvrages de tête (en l'occurrence les barrages) et transfère celle des canaux secondaires et des drains aux usagers (CONAGUA, 2014 ; Viqueira Palerm, 2006). Autrement dit, les institutions publiques se sont en partie retirées de la gestion des DR, ce qui pose question d'après Paz Sanchez (2012) étant donné l'impact et l'importance des pratiques agricoles sur les ressources en eau. D'ailleurs, étant donné les intérêts associés à la gestion de l'eau agricole et même s'ils se sont retirés des engagements systématiques associés à l'opération, à la conservation voire à l'extension des infrastructures secondaires de l'irrigation les pouvoirs publics sont ponctuellement amenés à intervenir sur ces infrastructures (ONU, 2011)(ce point est commenté plus en détail dans les Section 2.5.1 et 3.4). Et dans le cas du DR005 ces interventions sont d'autant plus notables étant donné les problématiques d'aridité et les enjeux transfrontaliers qui se rencontrent dans la gestion des eaux du *Río Conchos*.

---

<sup>98</sup> « Sociétés de Responsabilité Limitée »

<sup>99</sup> La transferencia de los distritos de riego a los usuarios tiene como marco jurídico la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley Federal de Aguas (LFA) al inicio del programa, y la Ley de Aguas Nacionales (LAN) que sustituyó a la anterior a partir del 2 de diciembre de 1992 y el Reglamento de esta última, publicada en 1994. En la década de los 80, por los altos costos de oportunidad y la reducción de subsidios, las obras de los Distritos de Riego, estaban en peligro de inutilizarse. Al crearse la Comisión Nacional del Agua (Sección 2.5.1) la solución adoptada fue entregarlos a los usuarios a través del Programa de transferencia de los Distritos de Riego a los Usuarios, en 1989.



Le DR 005 est le plus grand des deux DR concernés par l'ex TILA (présenté dans le point précédent). Or les variations climatiques observées depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle ont singulièrement affecté la vallée du d'eau *Río Conchos* (Arreguin Cortés, 2015), et ont eu de lourdes conséquences sur les pratiques agricoles. Dans ce contexte, les superficies irriguées ont été diminuées d'environ 30 000 ha, du fait du passage de deux récoltes annuelles à une seule récolte par an (Ortega-gaucin, et al., 2008 ; SEMARNAT-CONAGUA, 2015). En outre, il est même arrivé que le barrage ne contienne pas suffisamment d'eau et n'approvisionne donc pas le DR durant certains cycles agricoles (Lujan Alvarez, 2003 ; Ortega-gaucin, et al., 2008). Face à cette situation, des remaniements de fond ont été apporté aux infrastructures d'irrigation pour économiser l'eau. Les actions correspondantes ont fait intervenir les acteurs locaux mais aussi internationaux. Ils tiennent une place singulière dans le cadre plus général des programmes de rénovation et de modernisation des DR (CONAGUA, 2012 ; Lujan Alvarez, 2003), comme en atteste le diagnostic établissant spécifiquement une *Síntesis del Programa de Modernización y Tecnificación de los Distritos de Riego del Río Conchos*<sup>100</sup> (CONAGUA, 2002). Ce programme a vu le jour dans le cadre d'échanges (2002) entre les gouvernements mexicain et américain en rapport avec les sécheresses récurrentes des dernières années et la gestion du *Río Bravo*, l'objectif étant de permettre le respect du traité de 1944. Il s'agit d'un programme de certification des DR validant « la viabilidad técnica, la participación comunitaria y el de la sustentabilidad ». Tous les DR du *Río Conchos* devaient ainsi être évalués ; mais de fait, les efforts se sont majoritairement concentrés sur le DR005. En plus du surdimensionnement des structures agricoles, plusieurs études ont démontré que les infrastructures matérielles du DR005 engendraient un usage peu efficient de la ressource, avec de fortes pertes dans les réseaux de conduction (Ortega-gaucin, 2012 ; Ortega-gaucin, et al., 2008). Des subventions en provenance de CONAGUA ont donc été employées pour la restauration des canaux ; mais d'autres fonds en provenance de CONAGUA ainsi que de l'ONU et de la FAO ont aussi servis à acheter des droits d'eau à travers la mise en place du *Programa de Adecuación de Derechos de Uso del Agua y Redimensionamiento de los Distritos de Riego*<sup>101</sup> (le PADUA). Comme son nom l'indique, ce programme mis en place en 2004 ne concernait pas uniquement les DR du *Río Conchos* (SAGARPA, 2005). Il a été mené dans l'objectif de « récupérer » (renonciation partiel ou totale) des concessions

---

<sup>100</sup> « Synthèse du programme de modernisation et de technification des Districts d'Irrigation du Río Conchos »

<sup>101</sup> « Programme d'adéquation des droits d'usage de l'eau et de redimensionnement des Districts d'irrigation »

d'eau non utilisées en veillant à ce que la renonciation soit légale et non contestable. Il est apparu que la majeure partie des rachats de droits d'eau a concerné le DR 005 (SAGARPA, 2007).

La sous-région de Delicias qui fait partie des corridors de développement d'après la Section 2.1.1 est à l'interface de nombreux enjeux notamment en association avec les pratiques agricoles, mais aussi en ce qui concerne la qualité de l'eau (pour ses usages anthropiques mais aussi environnementaux). C'est pourquoi il est intéressant d'y observer les discours locaux à travers une approche qualitative pour compléter le diagnostic de vulnérabilité établi avec l'IPE-SIG.

## **2.2 Données disponibles pour la construction de l'IPE au Mexique : la collecte entre abondances et carences**

L'IPE est présentement calculé à partir de données publiques afin de favoriser la répliquabilité de la méthode au Mexique. Les indicateurs sont définis sur le modèle des autres études de l'IPE. Mais en suivant l'exemple du *water poverty mapping*<sup>102</sup> de Cullis et Gorgens (2006) des bases de données cartographiques sont associées aux bases de données statistiques traditionnelles. Cette démarche vise à renforcer la place du diagnostic de l'éco-hydrosystème dans l'IPE en valorisant la richesse et la complémentarité de ces deux corpus spécifiques (Section 1.4.2).

Comme le donne à voir cette section, les plateformes de l'Institut National de Statistiques et de Géographie (INEGI) et du Conseil National d'Evaluation de la Politique de Développement Social (CONEVAL), ainsi que le géo-portail de la Commission Nationale pour la connaissance et l'usage de la Biodiversité (CONABIO), et les sites de la Commission National de l'Eau (CONAGUA) concentrent et publient une multitude de données hydrologiques, environnementales et socio-économique sous ces deux formes pour l'ensemble du territoire mexicain. De telle sorte qu'il faut même procéder à des sélections de données spécifiques pour calculer l'IPE à partir de ces sources d'informations. Néanmoins

---

<sup>102</sup> Cette approche est présentée dans la Section 1.3.1

cette profusion de données cache certaines limites de ce corpus, limites dont il faut tenir compte puisqu'elles conditionnent la construction de l'IPE.

### 2.2.1 Bases de données socio-économiques : la profusion redondante des données mises en ligne par l'INEGI et le CONEVAL

L'INEGI et le CONEVAL publient sur des sites spécialisés une grande quantité d'informations socio-économiques qui peuvent être pertinentes dans le cadre du calcul de l'IPE. Il s'agit de différentes pages internet à partir desquelles différentes bases de données sont directement accessibles. Celles-ci sont d'une richesse notable, pourtant dans ce contexte d'abondance, certains vides suscitent des interrogations.

- Ressources en ligne de l'INEGI (2018)

L'INEGI alimente le Système *Estat* et Municipal de Base de Données (SIMBAD) (<http://sc.inegi.org.mx/cobdem/>) à partir de données socio-économiques collectées pour tous les états et toutes les municipalités du Mexique (Illustration 1). Cette plateforme contient des informations allant de 1990 à 2015 (mais de manière non systématique comme le signale la section 2.2.3), et concernant une multitude de domaines allant de la santé, à l'économie en passant par l'accès au logement, aux services d'assainissement et aux programmes de subventions publiques. Elle concentre de fait des relevés effectués par l'INEGI lui-même mais aussi par d'autres organismes publics tels que la CONAGUA. A ce titre, cette plateforme semble donc particulièrement intéressante pour le calcul de l'IPE.

En l'occurrence, la plateforme SIMBAD synthétise trois types de données utilisées dans la présente étude, à savoir :

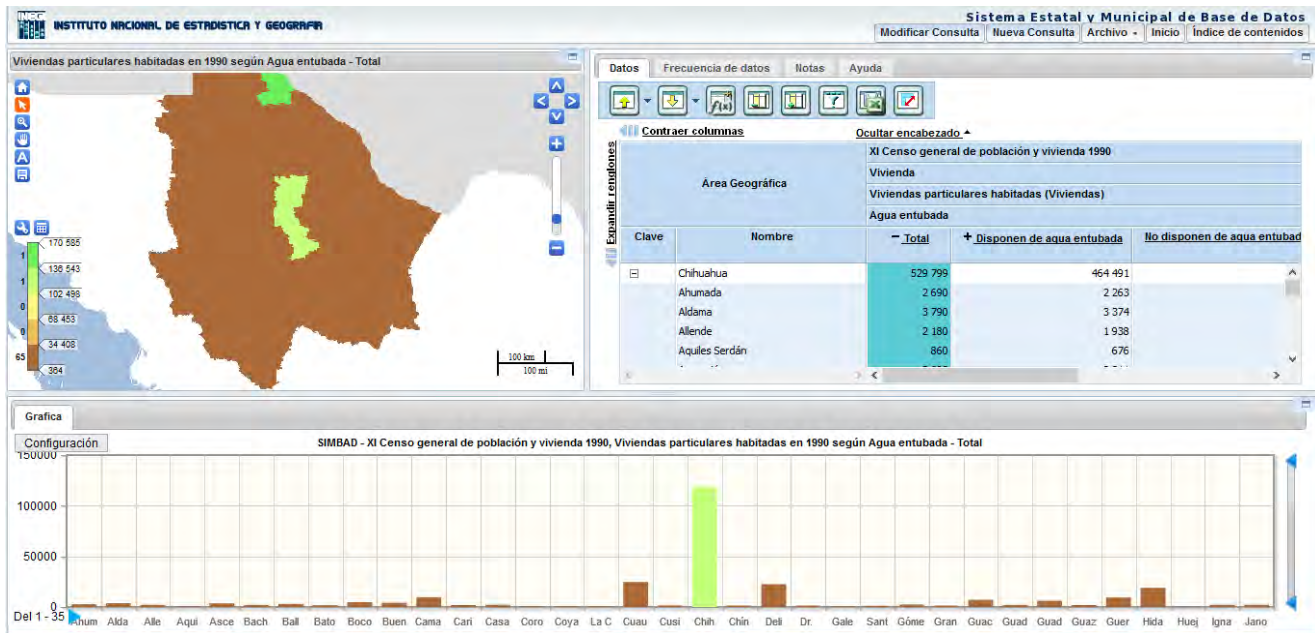
- ✓ Les « *Censos de Poblacion y Vivienda* »<sup>103</sup>, ainsi que les *Encuestas Intercensales*<sup>104</sup> du même ordre, élaborés tous les cinq à dix ans par l'INEGI (2010, 2015) l'INEGI, depuis 1990 ;

---

<sup>103</sup> « recensements de population et de logement »

<sup>104</sup> « enquêtes intermédiaires de recensement »

- ✓ la mortalité des enfants pendant leur première année de vie, publiée dans les *estadísticas vitales*<sup>105</sup> ;
- ✓ les « *Principales características económicas del sector agrícola, ganadero y forestal* »<sup>106</sup>, élaborées annuellement par la SAGARPA (2012) et publiés sur la plateforme jusqu'en 2012 au moment de la collecte ;
- ✓ le « *Censo Agrícola, Pecuario y Forestal* »<sup>107</sup> élaboré par INEGI (2007) et publié jusqu'à l'année 2007 au moment de la collecte ;
- ✓ les caractéristiques économiques du secteur d'activité des mines et des industries alimentées grâce aux *Censos económicos*<sup>108</sup> élaborées tous les cinq ans par l' INEGI (2009) et publiées sur la plateforme jusqu'en 2009 au moment de la collecte ;
- ✓ les relevés d'usage de l'eau à travers les différents secteurs d'activités et de consommation (élaborés annuellement par la CONAGUA de 2005 à 2009 et publiés sur SIMBAD jusqu'en 2009).



**Illustration 1: Plateforme SIMBAD (INEGI, 2018)**

<sup>105</sup> « Statistiques vitales »

<sup>106</sup> « Principales características económicas del sector d'agriculture, d'élevage et de l'activité forestière »

<sup>107</sup> « Recensement d'agricole, d'élevage et d'exploitation forestière »

<sup>108</sup> « Recensements économiques »

Ces données ne sont pas les seules qui pourraient servir au calcul de l'IPE<sup>109</sup>. Mais malgré sa profusion, SIMBAD ne permet pas d'accéder aux valeurs municipales de PIB, et ce alors qu'elles sont présentées à l'échelle *estatal*. L'absence de cet indicateur majeur est particulièrement notable : il reflète une position singulière du Mexique face aux indicateurs économiques qui jouent un rôle important dans la construction de l'IPE (Sections 2.2.3 et 2.3.1). A l'image de cette restriction, il faut signaler que la plateforme ne synthétise qu'une partie des données effectivement générées par les différents organismes publics. Elle suppose de fait une digitalisation des données, mais aussi un formatage aux échelles *estatal* ou municipale, et une actualisation régulière de la plateforme. Ainsi, est-il notable que SIMBAD synthétise les recensements de population et de logement de l'INEGI à l'échelle municipale, et ce alors qu'ils ont été générés à l'échelle plus fine des localités. En explorant le site officiel de l'INEGI (<http://www.inegi.org.mx/default.aspx>), les données à cette échelle sont de fait accessibles en format digital. De plus, à l'époque de la collecte d'information – opérée jusqu'en 2016 inclus – ce site donnait aussi accès à une enquête intermédiaire réalisée en 2015, qui n'avait pas été intégrée dans SIMBAD.

Dès lors, face à la profusion des données – redondantes mais variables – il s'agit de savoir quelles précisions et possibilités de discussions sont recherchées dans l'étude. Les points suivant donnent à voir que cette interrogation concerne aussi bien la collecte d'informations à travers la plateforme SIMBAD, que celle des autres informations accessibles en ligne (Section 2.2.3).

- Ressources en ligne du CONEVAL (2010)

Seulement deux des trois indicateurs nécessaires pour le calcul de l'IDH étant disponibles à l'échelle locale sur les bases de données de l'INEGI, la recherche de données a été étendue pour trouver le troisième indicateur ; en l'occurrence, l'indicateur économique. Pour cela c'est l'organisme du CONEVAL qui s'est avéré publier le plus d'information en ligne (<http://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Medicion-de-la-pobreza-municipal-2010.aspx>). Il publie en effet sur son site officiel des données socio-économiques relatives à la mesure de la pauvreté.

---

<sup>109</sup> Ce point est traité dans la section 2.2.3 car il concerne autant la plateforme SIMBAD que les autres sources de données.

Certaines d'entre elles sont intéressantes pour le calcul de l'IPE, mais d'autres doivent être traitées avec précaution et peuvent impliquer des transformations de taille pour la construction des composantes.

De fait, le site présente plusieurs tableaux qui sont des indices et non des bases de données. Autrement dit, comme l'IPE ils travaillent les données, et leur donnent un sens spécifique. En particulier, l'*Indice de Rezago Social*<sup>110</sup>, qui semblerait de prime abord intéressant pour la composante de capacité, est élaboré à partir de plusieurs indicateurs économiques et structurels. Parmi eux, on trouve l'indicateur d'accès à l'eau domestique. Or, celui-ci est déjà inclus dans la composante d'accès de l'IPE : son usage dans la composante de capacité est donc prohibé puisque cela impliquerait une redondance notable de l'indice. Notons ici que cette même restriction s'étend aussi à l'usage de l'IDH avec services, ou de l'IDH avec assainissement publiés sur SIMBAD. Il existe en somme une tradition singulière de mesure de la pauvreté au Mexique (CONEVAL, 2014) : elle adopte une approche multidimensionnelle et remplace aussi à l'échelle municipale l'utilisation du PIB par celle des ressources financières courantes totales par habitants (ICTPC d'après son sigle mexicain).

Au vu de ces commentaires, la présente étude utilise exclusivement des valeurs non retravaillées que ce soit par l'INEGI ou par le CONEVAL. Mais comme ces deux organismes, elle remplace le PIB par d'autres mesures. Ainsi, sur le site du CONEVAL deux ensembles de données sont valorisées :

- ✓ L'ICTPC donné en \$/hab/mois dans l'*Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares*<sup>111</sup>, publiée tous les cinq ans par le CONEVAL (2014) depuis 2005 (sa différence avec le PIB est commentée dans la section 2.2.3)
- ✓ Et le coefficient de Gini (lui-même élaboré à partir de l'ICTPC dans les mêmes enquêtes) et qui permet d'évaluer la cohésion sociale.

En l'état, ces informations sont pertinentes dans la présente étude car elles permettent de construire l'IDH. Néanmoins, il faut mentionner qu'elles sont publiées à l'échelle des municipalités, et ne permettent pas de distinguer en leur sein les caractéristiques économiques des différents secteurs d'activité. C'est pourquoi comme ils sont utilisés pour élaborer la composante de capacité, tandis que

---

<sup>110</sup> « Indice d'exclusion/carence sociale »

<sup>111</sup> « Enquête Nationale des Revenus et Dépenses des Foyers »

d'autres mesures (récoltées sur SIMBAD) remplacent l'utilisation du PIB dans la composante d'usage où il intervient traditionnellement (Section 2.3.1).

### *2.2.2 Bases de données environnementales : échelles et complémentarité des ressources en ligne de CONABIO et de CONAGUA*

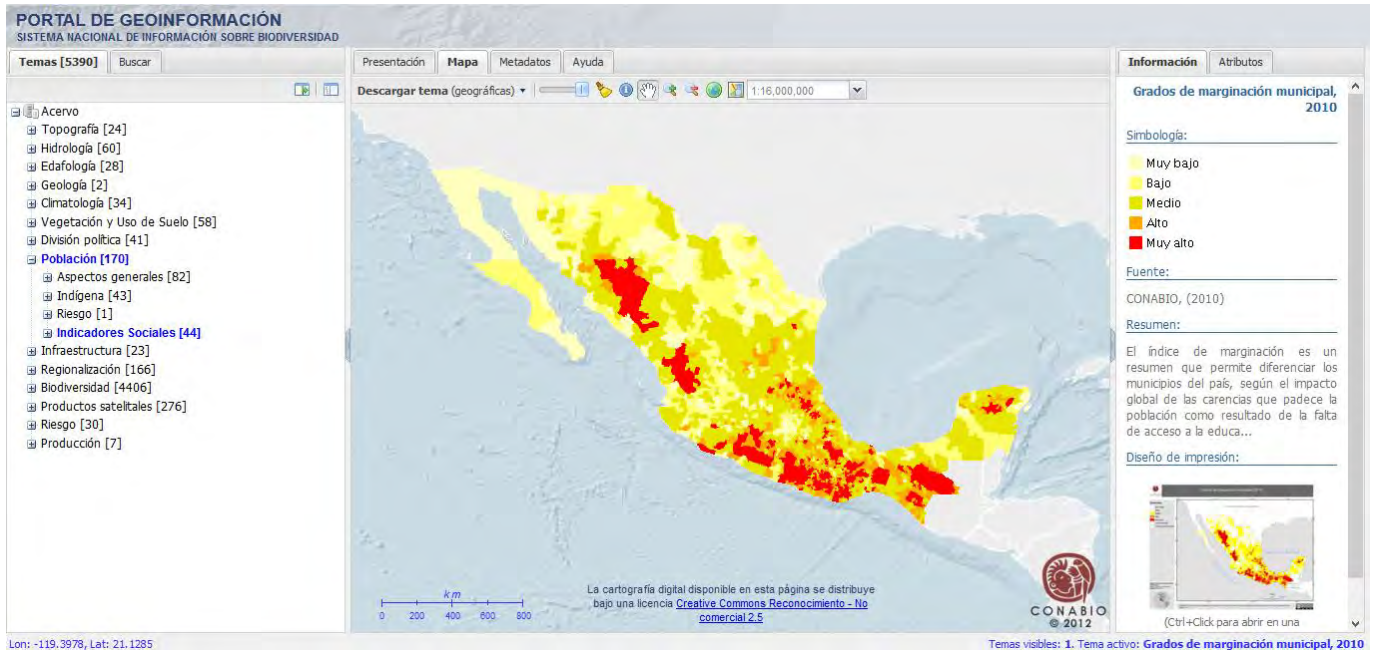
Tout comme l'INEGI concentre de multiples données pour l'ensemble du Mexique sur la plateforme SIMBAD, CONABIO gère une page internet qui synthétise de nombreuses données concernant le territoire mexicain. Celle-ci prend la forme d'un géo-portail et donne notamment accès à une profusion de données environnementales intéressantes pour le calcul de l'IPE. Néanmoins, quelques données importantes pour la présente étude en sont absentes et doivent être recherchées auprès de l'organisme qui s'intéresse spécifiquement à la gestion de l'eau, c'est-à-dire la CONAGUA. Ce paragraphe présente ces deux sources d'information majeures, tout en signalant des restrictions notables à leur sujet.

- Données environnementales de la plateforme de CONABIO (2012)

Cette page (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>), appelée aussi « système national d'information sur le biodiversité », est gérée par CONABIO. Elle présente donc l'information sous forme de cartes, élaborées sur des thématiques aussi diverses que : le climat, l'hydrologie, l'usage des sols et de la végétation, la biodiversité, les limites administratives, les principales routes, ou même lesdits « niveaux de marginalisation »<sup>112</sup> (Illustration 2).

---

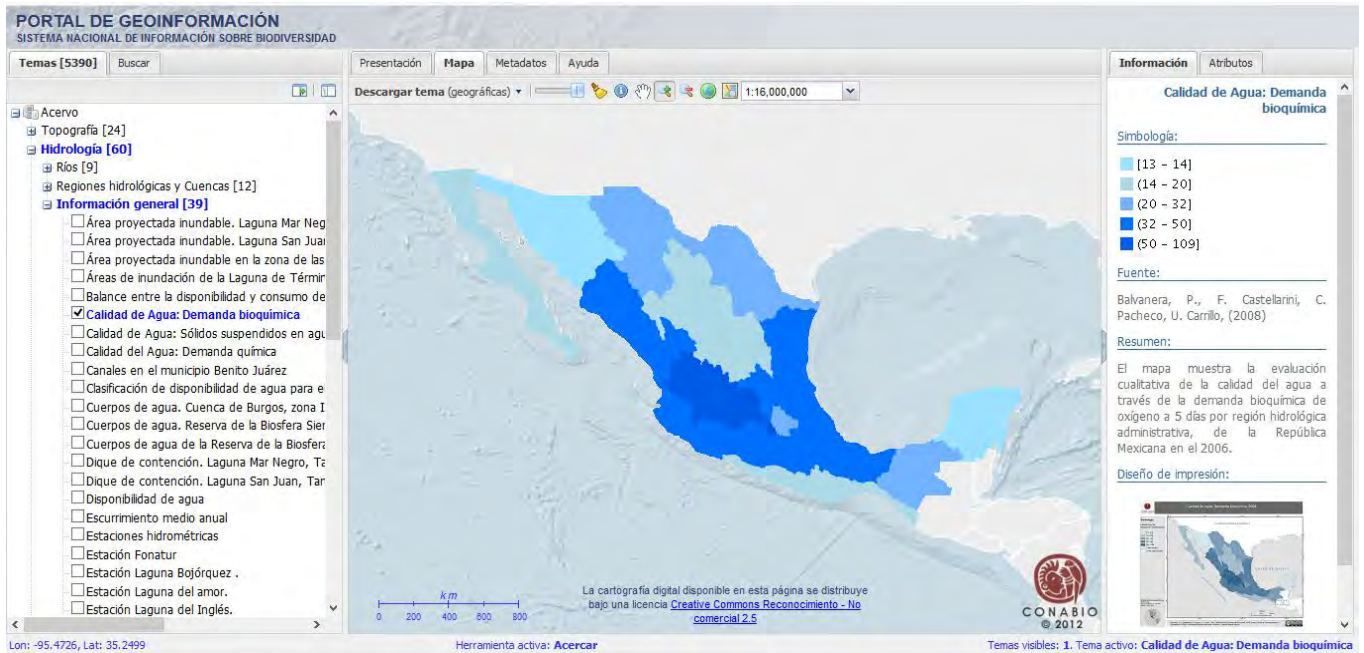
<sup>112</sup> A ce sujet, il convient de mentionner que le but de premier de CONABIO (2012) est bien la caractérisation environnementale et structurelle du territoire ; les données d'un autre ordre servant avant tout à intégrer les dimensions sociales et économiques de la gestion environnementale. En conséquence, le portail est exclusivement employé dans la présente étude pour collecter les données à caractère environnemental.



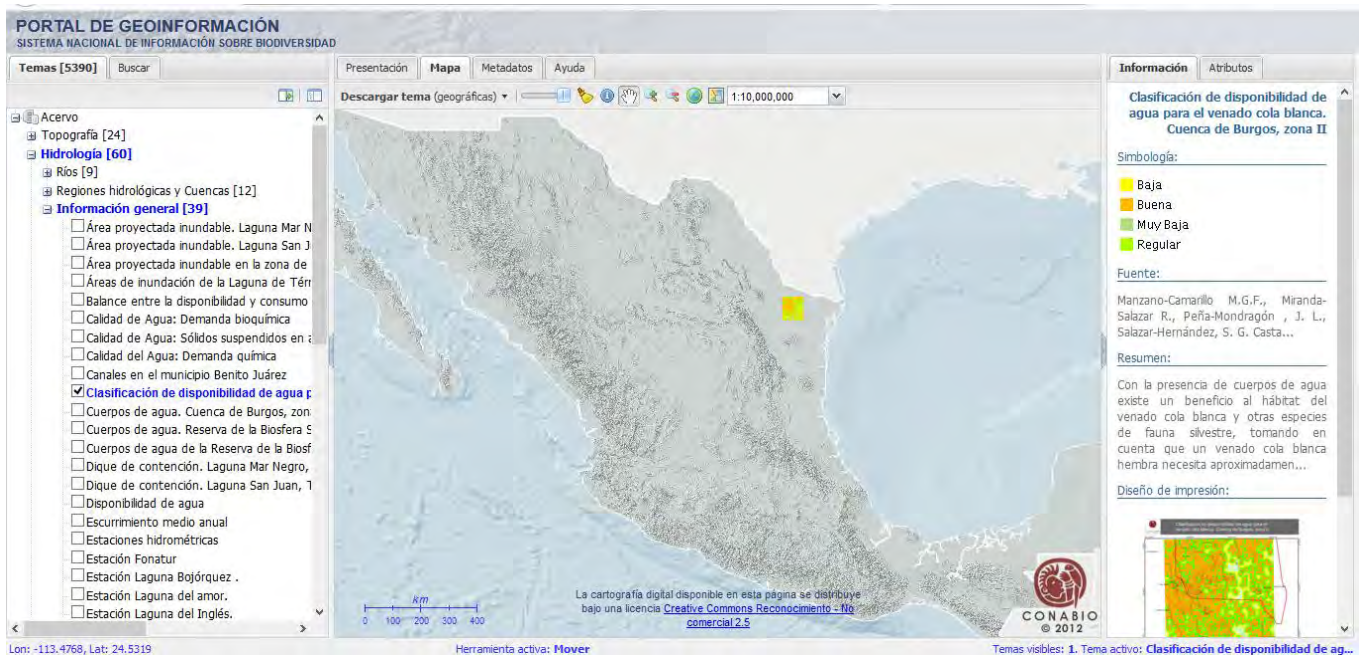
**Illustration 2 : Carte des niveaux de marginalisation, géo-portail de CONABIO (2012)**

Ce second site offre de fait un grand éventail de données hydrologiques et environnementales importantes pour le calcul de l'IPE. Comme dans le cas de SIMBAD, ces données sont générées par différents organismes, et présentent parfois des ressemblances mais aussi des dissemblances significatives. En l'occurrence, il faut mentionner que bon nombre des informations synthétisées sur ce portail concernent les échelles *estatales*, ou celles des régions hydrographiques présentées dans l'illustration 3. Ces données qui sont valorisables dans le cadre du calcul de l'IPE à grande échelle, ne sont néanmoins pas pertinentes dans le cas de la présente étude. Et il faut noter que même à grandes échelles, Fenwick (2010) mentionne qu'il serait intéressant de valoriser des données plus précises. Or les données plus fines sont moins nombreuses sur ce site. Il arrive même que certaines bases de données soient exclusivement disponibles pour des territoires localisés comme le sont les réserves nationales ou des vallées d'intérêts particuliers (Illustration 4).





**Illustration 3 : Carte de qualité de l'eau, demande biochimique (CONABIO, 2012)**



**Illustration 4 : Carte de disponibilité de l'eau pour les cervidés dans la Vallée de Burgos (CONABIO, 2012)**

Malgré ces restrictions, ce géo-portal contient plusieurs ensembles de données à la fois utiles pour le calcul d'un IPE-spatialisé, significatives à l'échelle des municipalités et disponibles pour tout le territoire. La présente étude utilise donc les cartes thématiques suivantes :

- ✓ *Escurrecimientos medio anual*<sup>113</sup>, élaborée à l'échelle 1 : 4000000, publiée en 2008, à partir de données Jimenéz Roman & Maderey-R. (1992) ;
- ✓ *Climas*<sup>114</sup>, élaborée à l'échelle 1:1000000, publiée en 2008, à partir de données de 1995 (CONABIO, 2012 ; García, 1998) ;
- ✓ *Uso de suelo y vegetación*<sup>115</sup> élaborées à l'échelle 1 : 250000, à partir de données de 1997 en ce qui concerne la série I (INEGI, 1998) et à partir de données de 2012 en ce qui concerne la série VI (INEGI, 2013b) ;
- ✓ *Degradación del suelo de la República mexicana*<sup>116</sup>, publiée au moment de la collecte en 2012 à l'échelle 1 : 250000, à partir de données de SEMARNAT (2004) ;
- ✓ *División municipal de México*<sup>117</sup> publiée tous les cinq ans à l'échelle 1 : 250000 jusqu'en 2005 au moment de la collecte (INEGI, 2005c) ;
- ✓ *División estatal de México*<sup>118</sup> publié à l'échelle 1 : 250000 jusqu'en 2012 au moment de la collecte (CONABIO, 2014).

Ces cartes servent à élaborer certains indicateurs hydro-environnementaux, mais elles permettent aussi de spatialiser l'analyse des bases de données statistiques (notamment en ce qui concerne les divisions municipales et l'usage des sols, Section 2.4.2). Néanmoins, aux échelles qui caractérisent cette étude, il manque des données hydrologiques, et des données de qualité de l'eau. Celles-ci sont collectées auprès d'un autre organisme, à savoir CONAGUA.

- Données hydrologiques publiées par la CONAGUA

Parmi ses attributions officielles, la CONAGUA doit réaliser le suivi des ressources hydriques et de leur gestion ; lesquels ont d'importantes implications en termes économiques et environnementaux. A ce titre, il faut noter que c'est notamment la CONAGUA qui produit les données publiées par CONABIO à l'échelle des régions hydrographiques. Ce suivi concerne autant les ressources d'eau superficielles que

---

<sup>113</sup> « Ecoulements annuels moyens »

<sup>114</sup> « Climat »

<sup>115</sup> « Usage des sols et de la végétation » (USV)

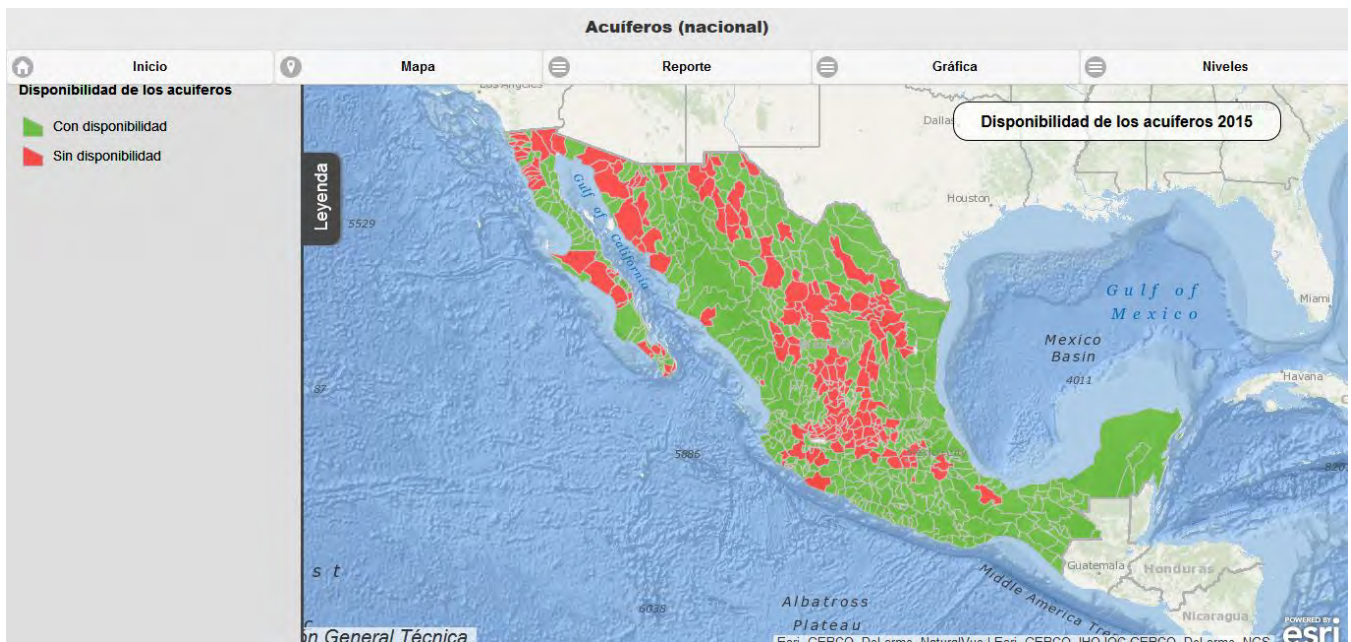
<sup>116</sup> « Dégradation du sol de la République mexicaine »

<sup>117</sup> « Division municipale du Mexique »

<sup>118</sup> « Division estatal du Mexique »

celles qui sont souterraines, et repose sur des caractérisations quantitatives mais aussi qualitatives. Néanmoins, la systématisation des suivis des eaux souterraines et de la qualité de l'eau est plus récente et plus coûteuse que celle concernant les quantités d'eau superficielles. Cela explique sans doute les limites de la diffusion des données relatives aux eaux souterraines : à la fois moins complètes, et moins synthétiques que celles relatives aux eaux superficielles. Ainsi, si elles ne sont pas reportées dans le géoportail de CONABIO (comme l'a indiqué le point précédent), elles sont tout de même accessibles à travers le site internet du gouvernement mexicain (<https://www.gob.mx>).

Ce site héberge notamment le *Sistema de Información Nacional del Agua*<sup>119</sup> (SINA) qui concentre sous forme de cartes différentes données caractérisant l'hydrosystème (<http://sina.conagua.gob.mx/sina/>) (CONAGUA, 2016c). Il intègre des données sur les eaux souterraines et sur la qualité de l'eau superficielle. Mais contrairement au portail de CONABIO ou à la plateforme de l'INEGI, il ne fournit qu'un type de données pour chacune des thématiques sur lesquelles porte la présente étude, respectivement : la disponibilité d'eaux souterraines, et la demande biochimique en oxygène (Illustration 5 ; Illustration 6 ; Illustration 7).



**Illustration 5 : Carte de disponibilité de l'eau pour les aquifères mexicains (CONAGUA, 2016c)**

<sup>119</sup> « Système National d'Information de l'Eau »



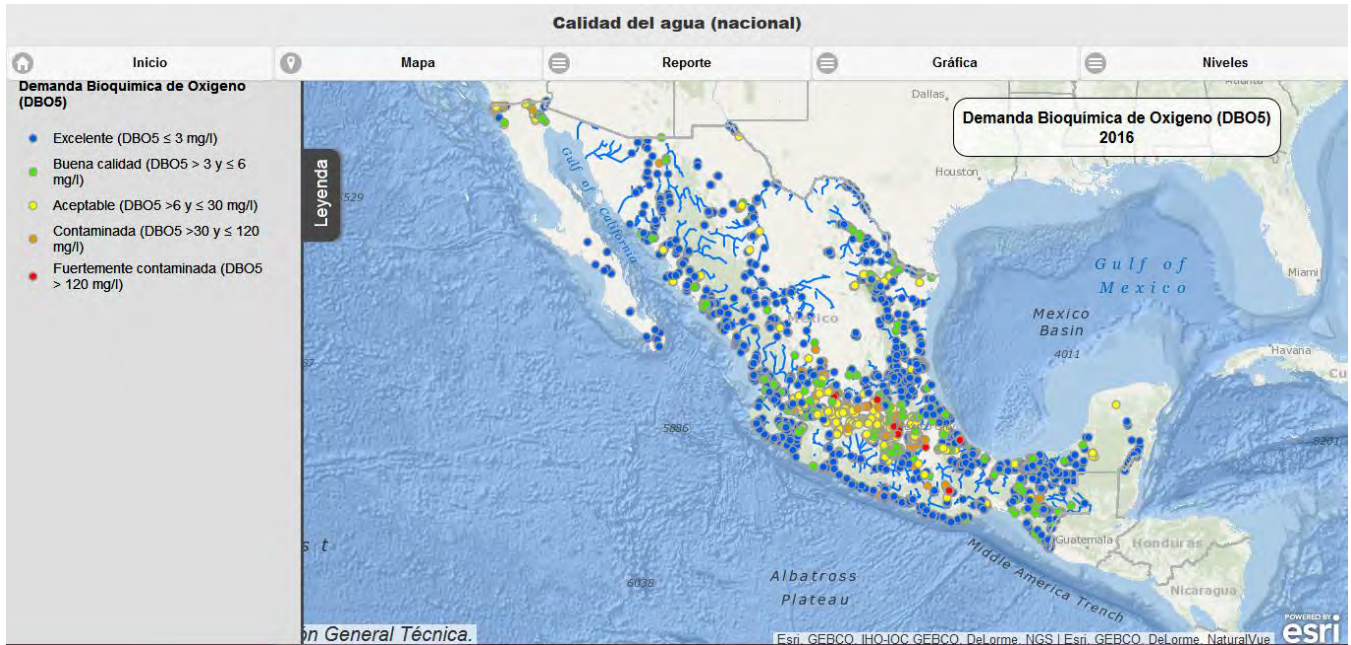


Illustration 6 : Carte de Demande Biochimique en Oxygène au Mexique (CONAGUA, 2016c)

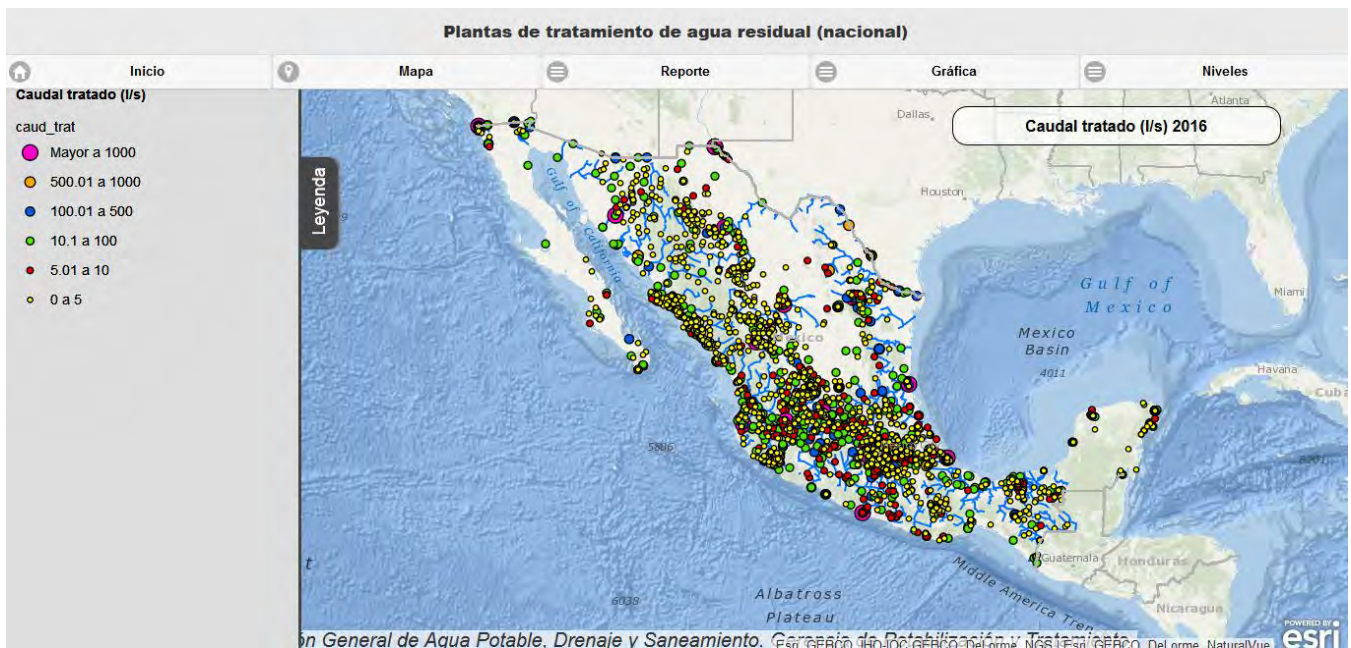


Illustration 7 : Carte des volumes d'eaux usées traités en l/s au Mexique (CONAGUA, 2016c)

Or, ces données s'avèrent peu pertinentes pour le calcul de l'IPE. Comme dans le cas des publications du CONEVAL (Section 2.2.1), il ne s'agit pas de bases de données, mais d'indices permettant de donner un sens à celles-ci (Section 1.1.3). Par conséquent, seule est collectée à partir de cette plateforme la carte

des aquifères : et ce, non pas afin d'élaborer les indicateurs correspondant, mais dans l'objectif de pouvoir les spatialiser. Au vu de ces commentaires – et comme il a été fait pour l'INEGI – c'est donc sur d'autres pages du site officiel, rattachées elles aussi à la CONAGUA (<https://www.gob.mx/conagua>), que les recherches ont été poursuivies.

Ce site permet précisément d'accéder à trois bases de données alimentées par la CONAGUA particulièrement utiles dans le cas de la présente étude, à savoir :

- ✓ le détail de l'actualisation des disponibilités d'eau souterraines par aquifère, issues du DOF du 20 avril 2015 (CONAGUA, 2015c) lors de la collecte ;
- ✓ les inventaires des stations municipales de potabilisation et de traitement des eaux résiduelles en opération, élaborés tous les ans depuis 2004 et publiés jusqu'en 2015 au moment de la collecte des données (CONAGUA et SEMARNAT, 2015) ;
- ✓ et les suivis de qualité de l'eau au Mexique, soit l'*Indice de Calidad del Agua*<sup>120</sup> (ICA d'après son sigle espagnol) publié par CONAGUA (2015b).

Il faut mentionner qu'elles présentent néanmoins un inconvénient, et une limite notable. D'une part, ces bases de données ne sont pas entièrement digitalisées et impliquent donc un travail de digitalisation dont le caractère relativement chronophage est un inconvénient pour le calcul de l'IPE. D'autre part, les données de qualité de l'eau ne couvrent pas uniformément tout le territoire mexicain : les points de suivi étant rigoureusement les mêmes que ceux signalés sur les cartes de SINA (Illustration 6 ; Illustration 7), ils posent particulièrement question dans le nord du pays.

- Autres données : sources et limites concernant en particulier la qualité de l'eau

En somme, les données nécessaires au calcul de l'IPE à l'échelle municipale sont accessibles à partir de sites en ligne officiels. De fait, en explorant les sites gérés par quatre organismes publics spécialisés dans le domaine de l'environnement et de l'eau, la précision des bases de données s'avère pertinente et suffisante pour construire sur l'ensemble du territoire mexicain les divers indicateurs qui composent l'indice. Seules celles relatives à l'utilisation d'intrants agricoles et à la qualité de l'eau présentent des carences vraiment notables en termes de précision. En ce qui concerne les intrants, il faut ainsi

---

<sup>120</sup> « Indice de Qualité en Eau »

mentionner que le recensement agricole de l'INEGI (2007) distinguent trois types d'intrants (fertilisants, insecticides et herbicides), mais n'établit aucune mesure de quantité, ni de toxicité et rémanence dans l'environnement de ces intrants. Or, il s'agit des deux aspects fondamentaux de cette question, car d'une part tous les intrants ne présentent pas la même nocivité et durée de vie pas, et d'autre part les volumes d'intrants utilisés déterminent aussi en grande partie leur impact de sur l'environnement (Section 2.3.3)<sup>121</sup>. Et en ce qui concerne la qualité physico-chimique de l'eau et le traitement des eaux usées, le problème d'échelle a quant à lui déjà été mentionné.

Tant pour ces thématiques que pour les autres, il est notable que d'autres bases de données peuvent exister, sous formes d'ouvrages, ou d'archives spécifiques conservées par les organismes publiques responsables. Certaines bases de données historiques peuvent exister localement, mais les coûts associés à leur collecte et à leur analyse les rendent peu pertinentes pour l'élaboration d'un IPE à l'échelle considérée. Certaines archives sont notamment accessibles à travers la plateforme de consultation en ligne des institutions mexicaines : <http://www.infomex.org.mx>. Mais cette alternative, intéressante a priori puisqu'elle permet en théorie d'affiner la précision et la spécificité des données, est en pratique limitée. Surtout lorsqu'il s'agit de trouver des données à la fois significatives à l'échelle des municipalités et disponibles pour tout le territoire. De fait, certaines données ont été sollicitées sur ce site en ce qui concerne notamment le traitement des eaux usées. Mais les modalités d'interrogations engendrent parfois des quiproquos, et doivent de plus être adressés à des organismes particuliers qui sont parfois difficiles à cerner et qui peuvent changer selon les états. En ce qui concerne le traitement des eaux usées, alors qu'il faut envoyer la demande aux « *Juntas de Aguas* »<sup>122</sup> pour l'Etat de Chihuahua, ce sont d'autres organismes qui détiennent ces informations. De telle sorte que dans le cadre de la présente recherche, ces données n'ont pas pu être collectées par ce moyen. A ce sujet, il faut d'ailleurs mentionner qu'une telle alternative multiplie les choix au lieu de les rationaliser, et qu'elle ne permet pas de venir à bout de toutes les restrictions associées à la collecte des données.

---

<sup>121</sup> Parmi les données collectées, une autre aurait a priori pu permettre de pallier ce manque : la carte de dégradation des sols (collectée sur CONABIO, 2012) qui comprend une analyse d'ordre physico-chimique. Mais elle s'avère moins précise que la précédente et ne fait que distinguer négativement les aires agricoles du reste du territoire.

<sup>122</sup> « Assemblées de l'eau »

### 2.2.3 *Prendre en compte les complémentarités et les limites des données publiques au Mexique pour rationaliser la sélection des données*

En terminant cette révision des données publiées en ligne, la richesse des informations disponibles est notable et engendre un corpus de données pertinent et suffisant pour calculer l'IPE à l'échelle municipale au Mexique. De fait, certaines exigences peuvent même être satisfaites et permettent d'atteindre des informations spécifiques à des échelles relativement précises.

Mais en parallèle certaines restrictions doivent être signalées en fonction de la recherche de représentativité : d'une part la précision et la continuité de certaines données (et notamment leur échelle et leur temporalité) posent question, et d'autre part leur fiabilité (CONAGUA, 2015a ; Fenwick, 2010 ; Hernandez et al., 2011). Dans cette section, il s'agit donc d'insister sur les limites de l'exhaustivité du corpus établi, et sur les stratégies adoptées pour sélectionner les données en accord avec les objectifs de l'étude.

- Temporalité des données

La temporalité du corpus de données collectées pose question à plusieurs égards. Tout d'abord, la majorité des données environnementales collectées sont seulement disponibles pour une seule date. De fait, seules les cartes d'usages des sols et de la végétation sont accessibles en ligne pour plusieurs dates aux échelles considérées présentement. A leur sujet, il faut d'ailleurs signaler que la méthode de suivi a évolué au cours du temps : en 1997 l'érosion formait partie des facteurs pris en compte, alors qu'en 2012 elle en avait été exclue. Autrement dit, sans traitement complémentaire, les données environnementales publiées en ligne ne permettent pas d'établir de perspective historique. Par ailleurs, il est notable que les dates des différentes études qui ont servi à les générer varient fortement, allant de 1992 à 2015. Même si la validité de ce type de données est plus durable que les données d'ordre socio-économique, cet élément est important à signaler. Pour pallier l'une ou l'autre de ces limites, il pourrait être fait appel à des archives ou bien à d'autres ensembles de données, collectées par des institutions ou des organismes de recherche, mais ces démarches sont particulièrement chronophages et resteraient sans doute incomplètes étant donné les objectifs fixés présentement. En effet, l'objectif étant d'appliquer une méthode pertinente à l'échelle des municipalités et reproductible à travers les territoires mexicains,

l'objectif d'uniformisation des sources poserait alors question (comme la section 2.2.1 l'a déjà mentionné en ce qui concerne la plateforme infomex). Ainsi, malgré l'intérêt que présenterait la comparaison de différents IPE élaborés à travers le temps, cette perspective est exclue de la présente étude, non seulement pour ces considérations sur la collecte des données environnementales, mais aussi en ce qui concerne celle des données socio-économiques.

Même si plusieurs ensembles de données socio-économiques similaires sont disponibles à différentes dates, elles présentent des restrictions en ce qui concerne l'approche historique. A ce titre il est par exemple notable que les recensements de population soient effectués par localité, alors que les enquêtes intermédiaires elles le soient aux échelles municipales (INEGI, 2010a, 2015). Cela renvoie à une différence de collecte, et change la précision des données. Au vu de cette différence la perspective historique ne pourrait pas être adoptée puisqu'elle supposerait de comparer des données issues de différentes techniques de collectes. A cela vient s'ajouter le fait que les indicateurs employés dans ces recensements et ces enquêtes changent au cours du temps (INEGI, 2000, 2005a, 2010a) :

- ✓ en 2000, les connexions aux réseaux d'eau et d'assainissement étaient codés : VP\_AGUENT et VP\_DRENAJ ;
- ✓ en 2005, elles étaient codées : VPH\_AGDV et VPH\_EXCSA ;
- ✓ et en 2010, elles étaient codées : VPH\_AGUADV et VPH\_DRENAJE.

Ces transformations vont de pair avec des changements dans la méthodologie de comptage comme en attestent les définitions de ces indicateurs. Par exemple en 2000 et 2010 c'est l'accès à « l'eau courante » (*agua entubada*) qui est mesurée, alors qu'en 2005 il s'agissait de l'accès au « réseau public » (*red publica*). De plus, certains indicateurs considèrent conjointement les connexions effectuées dans l'habitat ou dans le terrain, alors que d'autres les séparent ou passent sous silence cet aspect méthodologique. Ainsi, même au sein des bases de données produites par une même institution sur une même thématique, l'approche historique est critiquable.

Etant données ces restrictions, et malgré son intérêt, la perspective historique est présentement exclue de la méthodologie de calcul de l'IPE. Pour l'ensemble des études de l'IPE aux élaborées au Mexique comme ailleurs, l'indice est élaboré à partir de données dont les dates d'élaboration diffèrent (Fenwick, 2010 ; Manandhar et al., 2012 ; Sullivan et al., 2006). De fait, les variations et l'irrégularité des données font partie intégrante des difficultés de collaboration indirecte pour l'élaboration de diagnostics interdisciplinaires visant l'aide à la prise de décision (Frenken, 2005 ; Sullivan et al., 2002 ; UN, 2011).



Elles parlent sans doute de l'évolution des méthodes de suivi, mais aussi des coûts et des enjeux de la production de données, et de la rationalisation dans leur utilisation dans des recherches scientifiques. Le point suivant permet d'observer comment la dimension politique des données, déjà mentionnée, est présentement négociée pour calculer l'IPE au Mexique.

- Pertinence et rationalisation des données

Les questions relatives aux données sont particulièrement importantes au Mexique et prennent plusieurs formes (Fenwick, 2010 ; Hernandez et al., 2011 ; Lopez-Calva et al., 2004). En effet, on a vu qu'une grande quantité de données sont accessibles à de grandes échelles, et que les informations sont plus restreintes sur certaines thématiques ou à des résolutions plus fines. Cela parle de la manière dont les données sont élaborées (collectes mais aussi construction des indicateurs correspondant). En ce qui concerne la qualité de l'eau, ou les ressources souterraines par exemple, le suivi est coûteux. Et il faut ajouter à cela qu'il est aussi délicat car il dépend de pratiques individuelles qui ne sont pas toujours faciles à déterminer et dont les enjeux économiques sont forts (la section 3.4 aborde ces questions dans la partie sociale de l'analyse). Autrement dit, certaines données sont parfois difficiles à élaborer pour les autorités étant donné les coûts et les enjeux économiques de leur suivi. Mais la disponibilité et la représentativité d'autres données concernant des thématiques économiques qui sont quant à elles abondamment suivies, posent aussi question au Mexique, comme l'ont souligné Lopez-Calva et al. (2004) dans le cadre du calcul de l'IDH, et Jimenez (2008) dans une étude sur l'eau dite potable, ou encore la CONAGUA (2015) dans l'actualisation de la disponibilité en eaux souterraines pour l'aquifère Aldama-San Diego. Dans ce contexte, certains choix ne viennent pas de la difficulté du suivi, mais des intérêts existants à son égard. L'exemple des données concernant l'irrigation sur la plateforme SIMBAD permet de détailler ce point important.

La plateforme SIMBAD regroupe plusieurs ensembles de données concernant l'accès à l'irrigation : les recensements d'agriculture et d'élevage de l'INEGI (2007) d'une part, mais aussi les relevés de la SAGARPA (2012). Ces deux ensembles diffèrent à plusieurs égards. Tout d'abord, il faut noter que le premier est réalisé tous les cinq ans à l'échelle des unités de production, alors que l'autre est élaboré annuellement par hectare. Ensuite, il faut remarquer aussi que le recensement élaboré par l'INEGI (2007) distingue différentes techniques d'irrigation, alors qu'elles sont toutes regroupées en une seule

catégorie dans les données de la SAGARPA (2012). De la même façon, pour la composante de capacité, il est notable que plusieurs données nécessaires au calcul de l'IDH sont disponibles dans les recensements de population élaborés à l'échelle locale (INEGI, 2010a), mais que parallèlement l'IDH lui-même est fourni par habitant à l'échelle des municipalités. Cependant, au moment de la collecte – opérée jusqu'en 2016 inclus – les données accessibles séparément étaient disponibles pour l'année 2010, alors que l'IDH n'était publié sur SIMBAD que jusqu'à l'année 2005. Les différences révélées dans ces exemples sont notables, et font (entre autres) écho aux dimensions politiques des données générées par différents organismes publics (Section 3.1.3).

D'ailleurs, le fait qu'au Mexique les indicateurs socio-économiques varient dans le temps, et ne soient pas conformes aux normes établies pour le suivi du développement au niveau international sont significatifs en ce sens. En effet, en remplaçant le PIB par le PBT, les institutions mexicaines s'inscrivent en marge des cadres conceptuels et méthodologiques définis sur la scène internationale (Hernandez et al., 2011). Cette prise de distance réduit les possibilités de comparaison, et freine celles de collaborations sciences/société. A ce titre, les données publiques doivent donc être employées avec précautions au Mexique.

Cette limite existe en de nombreux endroits du globe et même si la qualité des données rend parfois discutables les études statistiques, celles-ci continuent d'enrichir à ce jour les débats scientifiques et politiques autour des questions de pauvreté et de gestion de l'eau. En conséquence, cette restriction qu'il convient de mentionner, ne rend pas moins importante la présente réflexion portant sur le calcul de l'IPE. Mais dans ce contexte, il faut informer sur cette limite lors de la diffusion des résultats, et rationaliser la sélection des données : il s'agit d'opérer des choix transparents et argumentés.

- Rationaliser la sélection des données : explicitation des choix

La présente étude calcule l'IPE à une échelle représentative pour les municipalités et de telle sorte à ce que la méthodologie soit applicable sur l'ensemble du territoire mexicain. Par conséquent, elle s'intéresse exclusivement aux données accessibles sur le net à travers les sites gérés ou alimentés par les institutions que sont l'INEGI, le CONEVAL, la CONABIO et la CONAGUA. Aucune donnée n'a donc été collectée en dehors de ces sites. L'objectif étant de se conformer aux objectifs définis pour le calcul

de l'IPE : en somme réduire les coûts de la recherche et valoriser les données créées par les autorités publiques pour poursuivre la négociation concernant la collaboration sciences/société.

En outre, le calcul de l'IPE est spatialisé, afin de discuter les dynamiques territoriales de la pauvreté en eau et la représentativité de l'indice. C'est pourquoi les données les plus précises et les plus riches, par rapport aux échelles considérées, ont été privilégiées par rapport aux autres. C'est ce qui explique notamment l'utilisation du recensement de population de 2010 élaboré à l'échelle des localités, à la place de l'enquête intermédiaire de 2015 élaborée au niveau municipal, ainsi que l'utilisation des données de 2007, dans lesquelles l'INEGI précisent les techniques d'irrigation, plutôt que celle de 2013 que la SAGARPA ne les précise pas. De plus, cette recherche de précision a conduit à choisir les données les plus brutes possibles : les indices et les données que l'on pourrait qualifier de complexes ont été exclus au profit des bases de données moins travaillées. En l'occurrence, cela a impliqué de ne pas utiliser l'IDH publié sur SIMBAD à l'échelle municipale, mais bien de le recalculer à partir des indicateurs qui ont été collectés séparément et à l'échelle des localités. Une fois atteint l'objectif de précision, ce sont les données les plus récentes qui ont été utilisées. En conséquence, la collecte socio-économique concerne la période de temps allant de 2005 à 2015, et les données environnementales celle de 1992 à 2015.

Ces règles ont été respectées pour l'ensemble de la collecte, mais il faut signaler qu'elles posent question en ce qui concerne les données de qualité de l'eau. En effet, les précisions véritablement adéquates n'ont pas pu être atteintes. Même en ce qui concerne l'accès à l'eau potable, elles posent d'ailleurs question. En effet, les recensements de population présentent des données de « connexion aux réseaux d'eau potable », mais il a été démontré que la ressource qui circule dans les installations auxquelles il est fait référence dans cette formulation n'est pas toujours apte à la consommation (Ernesto & Gómez, 2007 ; Jimenez, 2008). Néanmoins, conformément à la tradition existant respectivement à cet indicateur (UN, 2011), ces données sont malgré tout valorisées aux échelles régionales dans l'IPE dans le cadre de l'accès à l'eau dite potable (Fenwick, 2010). Cependant, pour signaler cette problématique importante la terminologie « réseau d'eau domestique » en référence aux usages domestiques de l'eau – qui incluent la consommation humaine – remplace celle « réseau d'eau potable » qui est couramment utilisée dans la composante d'accès.

En outre, en ce qui concerne les composantes environnementales, il faut mentionner que pour la qualité chimique de l'eau et les stations d'épurations, les données sont restées ponctuelles. En outre, pour la qualité chimique, le détail des relevés ayant servis à construire l'indice de qualité de l'eau en 2015 n'est pas publié par la CONAGUA. Les indicateurs correspondant sont donc élaborés de telle sorte qu'ils tiennent compte de cette limite (Section 2.3.3). En ce qui concerne les contaminations d'origines agricoles, le suivi est difficile et pose question tant du point de vue technique que du point de vue géopolitique (Falconer, 2002 ; Lewis et al., 2016 ; United Nations, 2017). Dans ce contexte face à l'importance de la problématique et aux carences que présentent les données, la présente étude a été réalisée en insistant sur cette problématique spécifique. De fait, elle reprend la démarche employée par le COLPOS en signalant négativement les aires agricoles du point de vue de la contamination chimique. Néanmoins, au lieu d'une valeur commune à toutes les aires agricoles, l'interprétation statistique tend à intégrer les deux dimensions signalées comme fondamentales à ce sujet. Cette démarche qui va dans le sens de la valorisation de données environnementales spécifiques s'inscrit dans la lignée du *water poverty mapping*, et rompt avec les analyses statistiques majoritairement employées pour construire l'IPE (Section 1.4.2).

En somme les bases de données proposées par les autorités publiques mexicaines sont riches et permettent de calculer l'IPE de telle sorte qu'il soit pertinent à l'échelle municipale. En outre, leur diversité permet de discuter l'intégration du développement et des problématiques environnementales au sein de cet indice : en employant deux types de données distincts pour caractériser les facteurs socio-économiques d'une part et hydrologiques et environnementaux d'autre part. Et afin de valoriser la richesse de ce corpus hétérogène, les analyses statistiques sont elles aussi complétées par des analyses cartographiques pour construire les indicateurs de l'IPE présentés dans la section suivante.

### **2.3 Analyse des données utilisées pour évaluer la pauvreté en eau sur le territoire mexicain : élaborer les indicateurs de l'IPE**

Une fois les données sélectionnées, une première phase d'analyse intervient pour obtenir les indicateurs de l'IPE (Garriga et Foguet, 2010a). Cette interprétation initiale qui transforme les données pour leur

donner du sens, joue un rôle crucial. A ce sujet, Garriga et Foguet (2010a) signalent une double exigence de clarté et de pertinence :

*« indicators should meet some basic criteria [Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) 1993 ; Feitelson and Chenoweth 2002 ; Jiménez et al. 2008] : (1) **available** (measurable at no/reasonable cost) ; (2) **understandable** (exactly defined to be easily accepted by those who are likely to use it) ; (3) **accurate** (supported by reliable information) ; (4) **scalable** at different administrative levels ; (5) **relevant** (responsive to changes) ; (6) **regularly updatable** ; and (7) **integrative** among the environmental, social and economical aspects. »*<sup>123</sup>

En somme, la démarche analytique doit être particulièrement transparente et argumentée. Parallèlement, elle constitue aussi un formatage des diverses données qui doivent adopter une forme permettant de comparer entre eux les territoires considérés. En l'occurrence, certaines données sont des chiffres qui répondent déjà partiellement à ce critère, mais d'autres données contiennent plusieurs types d'informations ou présentent au contraire des carences. De telles données ne permettent pas directement de comparer entre eux les territoires : c'est le cas des données de concessions d'eau par exemple, qui livrent des volumes peu parlant (Section 2.3.1). Dans ces cas, il convient d'associer plusieurs types de données et d'établir des rapports qui peuvent alors être comparés entre eux... D'autres données quant à elles sont manquantes. Dès lors, il faut définir une stratégie pour combler les vides et remplacer les données incongrues (OECD et JRC, 2008). Et il faut signaler aussi que la construction de certains indicateurs définit des situations incohérentes : c'est le cas de pourcentages supérieurs à cent (Section 2.3.1). Dans ces cas, les valeurs correspondantes sont traitées de la même façon que si les données étaient manquantes. Enfin, il faut noter que l'EMC accepte différentes formes d'indicateurs (Maestripieri, 2012), mais que toutes doivent être chiffrées. Or certaines données sont de nature qualitative (Sections 2.3.2 et 2.3.3). Dès lors, l'indicateur doit être transcrit sur une échelle pertinente

---

<sup>123</sup> « les indicateurs doivent répondre à un certain nombre de critères fondamentaux [...] : (1) disponibles (mesurables gratuitement ou à un coût raisonnable) ; (2) compréhensibles (définis exactement pour être facilement accepté par ceux qui devraient l'utiliser) ; (3) précis (fondés sur des informations pertinentes) ; (4) représentatifs à différents niveaux administratives ; (5) pertinents (sensibles au changement), régulièrement actualisable ; et intégrant les aspects environnementaux, sociaux, et économiques ».

pour comparer les territoires entre eux, et chiffrée de manière à être exploitable pour opérer l'EMC sous TerrSet.

Cette partie justifie les choix opérés dans ces différentes situations, sachant qu'en cas d'absence de données ou en présence de données incongrues – dans le cas de pourcentages supérieurs à cent en particulier – une valeur moyenne est utilisée en remplacement desdites données. Pour cela elle détaille tour à tour les méthodes de construction des différents indicateurs constitutifs de l'IPE.

### 2.3.1 *Indicateurs socio-économiques organisés dans trois composantes*

Le contenu des trois composantes qui regroupent les données socio-économiques et celles de la distribution et de la valorisation de l'eau fait consensus dans presque toute la littérature spécialisée (Castelazo et al., 2007 ; Fenwick, 2010 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Li et al., 2011). De fait les composantes de capacité et d'accès sont en grande partie élaborées à partir d'indicateurs utilisés dans le suivi des MDG et SDG (UN, 2011 ; United Nations, 2017). Par conséquent la présente étude reprend dans la mesure du possible les indicateurs traditionnels dont les données associées et les unités sont détaillées dans cette section. Néanmoins, quelques adaptations sont à noter étant donnée la disponibilité des données – notamment l'absence du PIB à l'échelle municipale – d'une part, et de la géospatialisation de l'analyse – notamment pour les territoires ruraux et agricoles – d'autre part.

- Indicateurs de capacité

En accord avec la tradition du calcul de l'IPE, la composante de capacité est élaborée comme un IDH (Sullivan et al., 2002). A ce titre elle repose sur quatre indicateurs (UN, 2010) :

- ✓ un indicateur économique ;
- ✓ un indicateur dit de cohésion sociale<sup>124</sup> ;
- ✓ un indicateur de mortalité infantile ;

---

<sup>124</sup> Il illustre l'homogénéité de la répartition des richesses (Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003).

✓ et un indicateur d'éducation.

Le calcul de l'IDH ayant acquis une importance toute particulière depuis l'élaboration des MDG (UN, 2011), les autorités mexicaines publient les données correspondantes en les formatant de telle sorte à être directement exploitables comme indicateurs de développement humain (Tableau 8). Autrement dit, presque aucune transformation des données n'est nécessaire : il suffit de les intégrer à l'échelle voulue pour former la composante de capacité.

| Composante     | Indicateurs |                     | Mesures  | Sources          |
|----------------|-------------|---------------------|--|------------------|
| Capacité (IDH) | C1          | Economique          | ICTPC (\$/hab/mois)                                      | (CONEVAL, 2010b) |
|                | C1b         | Cohésion sociale    | Coefficient de Gini                                      | (CONEVAL, 2010a) |
|                | C2          | Mortalité infantile | Taux de mortalité chez les enfants de moins de un an (‰) | (INEGI, 2010a)   |
|                | C3          | Education           | Niveau moyen de scolarité                                |                  |

**Tableau 8 : Indicateurs de la composante de capacité (IDH)**

Présentement, l'indicateur économique ainsi que celui de cohésion sociale sont élaborés à partir de l'ICTPC qui est publiée à l'échelle municipale, contrairement au PIB. En accord avec la tradition mexicaine (Lopez-Calva et al., 2004), cet indicateur considère les ressources monétaires et non monétaires (CONEVAL, 2010b), contrairement au PIB qui se concentre exclusivement sur les ressources monétaires (Van Den Bergh, 2009). Ce même indicateur sert aussi au CONEVAL pour élaborer le coefficient de Gini à l'échelle municipale (CONEVAL, 2010a). Conformément à la tradition du calcul de l'IDH et dès lors de l'IPE, celui-ci permet d'évaluer la cohésion sociale (Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003), et est intégré à ce titre dans la composante de capacité.

En ce qui concerne l'indicateur de mortalité infantile, c'est le taux de mortalité des enfants de moins de un an qui est présentement employé comme l'ont fait aussi Castelazo et al. (2007) et Fenwick (2010) pour calculer l'IPE au Mexique. Il faut noter à ce sujet que certaines municipalités présentent des taux de 0 pour l'année considérée. Mais cela ne peut être considéré comme représentatif sur le long terme – d'ailleurs les données concernant les autres années le confirment—. Dès lors, c'est le taux moyen observé sur l'échantillon qui a été employé pour remplacer les valeurs nulles.

Enfin, pour l'indicateur d'éducation, il a été élaboré d'après le critère retenu dans les MDG, à savoir la finalisation de l'enseignement primaire (UN, 2011). Pour cela c'est l'indicateur de *Grado promedio de escolaridad*<sup>125</sup> du recensement de population de l'(INEGI, 2010a) qui a été sélectionné, et analysé à l'échelle des localités. Plusieurs données étant manquantes à ce sujet, elles ont été comblées en employant le niveau moyen observé sur l'échantillon (pour chacune des quatre unités démographiques définies dans la section 2.4.2). Notons que les autres indicateurs sont intégrés dans l'IPE à l'échelle des municipalités – faute de données locales – et qu'en ce qui concerne l'indicateur d'éducation, plusieurs modalités d'intégration sont appliquées à l'échelle locale (Sections 2.4.2).

- Indicateurs d'accès

Concernant la composante d'accès, trois indicateurs sont employés conformément à la littérature spécialisée qui intègre les problématiques agricoles dans cette composante (Tableau 9) : l'accès au réseau d'eau domestique, l'accès à l'assainissement, et l'accès à l'irrigation (Castelazo et al., 2007 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Li et al., 2011 ; López Álvarez et al., 2013).

| Composante | Indicateurs |                                 | Mesures   | Sources        |
|------------|-------------|---------------------------------|---|----------------|
| Accès      | A1          | Technification de l'agriculture | Unité de production irriguée et technifiée (%)            | (INEGI, 2007)  |
|            | A2          | Réseau d'eau domestique         | Logements avec un accès au réseau d'eau public (%)        | (INEGI, 2010a) |
|            | A3          | Réseaux d'assainissement        | Logements connectés au réseau d'assainissement public (%) |                |

**Tableau 9 : Indicateurs de la composante d'accès**

Comme pour la composante de capacité, le suivi de l'accès aux réseaux d'eau domestique et d'assainissement s'inscrit aujourd'hui dans une tradition établie et largement diffusée depuis les MDG (UN, 2011). Cependant, les données sont collectées sur le recensement de population et de logement

<sup>125</sup> « Degrés moyen de scolarité »



puisqu'elles y sont disponibles à l'échelle des localités. Il s'agit donc de données brutes, qu'il convient de formater. En l'occurrence, les indicateurs sont construits en pourcentage de logements habités respectivement connectés à ces réseaux. Les formules appliquées sont les suivantes :

**Équation 4 :**

$$A2 = \frac{VPH\_AGUADV * 100}{TVIVPARHAB}$$

**Équation 5 :**

$$A3 = \frac{VPH\_DRENAJ * 100}{TVIVPARHAB}$$

Avec A2 et A3, respectivement indicateurs d'accès au réseau d'eau domestique et au réseau d'assainissement ; VPH\_AGUADV étant la valeur publiée par l'INEGI (2010) concernant les « logements particuliers habités qui ont accès à l'eau courante dans le logement, ou hors du logement mais dans le terrain » ; VPH\_DRENAJ, la valeur publiée par l'INEGI (2010) concernant les « logements particuliers habités qui ont accès à un assainissement connecté au réseau public, une fosse septique, un ravin, une brèche, un cours d'eau, un lac ou la mer » ; et TVIVPARHAB, la valeur publiée par l'INEGI (2010) concernant les « logements particuliers habités de n'importe quel type [...]. Sont inclus les logements particuliers sans informations d'occupants »<sup>126</sup>.

L'opération de ces calculs a engendré plusieurs valeurs incongrues, puisque certaines entités recensaient des pourcentages d'accès supérieurs à 100 %. Dans ces cas, les valeurs incongrues ont donc été ramenées au pourcentage moyen observé pour l'échantillon (pour chacune des échelles observées dans la section 2.4.2).

---

<sup>126</sup> Une autre valeur aurait pu être employée ici : répertoriée VIVIPARHAB par l'INEGI (2010), elle correspond aux « logements particuliers habités de n'importe quel type [...] Sont exclues les logements particuliers sans informations d'occupants ». Néanmoins, moins de logements seraient alors inclus dans ce total, et présentement l'autre valeur, plus globale a été préférée.

Enfin, l'indicateur d'irrigation qui n'est pas systématiquement inclus dans le calcul de l'IPE, prend à travers les études l'une des deux formes suivantes : le rapport entre les terres irriguées et l'ensemble des terres arables (Castelazo et al., 2007 ; Li et al., 2011 ; López et al., 2013), ou le taux d'accès à l'irrigation par habitant (Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003)<sup>127</sup>. Néanmoins, les données de INEGI (2007) définissent la technification des unités de production par municipalité :

- ✓ n'emploient pas de technique d'irrigation (ou pour lesquelles aucune donnée n'a pu être collectée) ;
- ✓ emploient des canaux pour irriguer les cultures ;
- ✓ emploient des canaux en ciment pour irriguer les cultures ;
- ✓ emploient pour irriguer les cultures d'autres technologies, présentement concentrées sous l'appellation « sous pression » à l'image de Frenken (2005).

Ces données, exprimées en pourcentage, permettent donc de déterminer les modalités d'agriculture majoritairement employées par les agriculteurs irrigants au sein des municipalités qui composent le terrain d'étude. A partir de cette base de données l'indicateur est finalement construit en caractérisant les pratiques agricoles majoritaires : elles ont été classées en cinq catégories en fonction des types de technologies majoritairement employées pour l'irrigation des unités de production (Tableau 10). Afin d'obtenir une forme exploitable sous TerrSet ces catégories ont été chiffrées de 1 à 5 : 1 correspondant au type d'agriculture considérée comme étant la moins efficiente, et 5 correspondant à la plus efficiente. Le niveau d'efficience est déterminé en accord avec l'IPCC, à savoir en fonction de la quantité d'eau appliquée pour les différentes biomasses considérées (Parry et al., 2007). A partir de cette définition, les techniques dites « sous pression » sont plus efficaces que les autres, c'est pourquoi elles forment les catégories 4 et 5 : les *multi-compuertas*<sup>128</sup> étant séparées des techniques d'aspersion et goutte à goutte puisque les infrastructures de conduite sous pression s'arrêtent à l'entrée de la parcelle dans le premier cas, alors qu'elles arrivent directement jusqu'aux plantes dans le second. Ainsi définie, les cinq catégories déterminent le niveau d'aptitude (Section 2.4.1).

---

<sup>127</sup> Deux études ajoutent encore à ces indicateurs des informations relatives aux conflits liés à l'eau, ou l'accès à des informations relatives à la ressource (Parga et al., 2006 ; Pineda, 2016), les deux ayant été menées au Mexique, nous les mentionnons ici sans en faire néanmoins un sujet de discussion.

<sup>128</sup> « Multi-vannes » : au moyen d'une pompe l'eau est conduite à travers des tubes qui apportent l'eau à l'entrée des différents sillons qui composent la parcelle.

| Agricultures majoritaires       | Catégories |
|---------------------------------|------------|
| Saisonnaire                     | 1          |
| Canaux en terre                 | 2          |
| Canaux revêtus                  | 3          |
| Multi-compuertas <sup>129</sup> | 4          |
| Aspersion ou goutte à goutte    | 5          |

**Tableau 10 : Classification des différents accès à l'irrigation**

Si cette méthode présente encore des limites puisqu'il s'agit présentement d'une classification établie par municipalité, et que la classification doit être débattue et sans doute affinée, elle pourrait néanmoins être appliquée sur des échelles de données très fines. A ce titre, elle ouvre des perspectives intéressantes en ce qui concerne l'intégration des spécificités agricoles des territoires étudiés ; et c'est pourquoi elle a été adoptée dans le cas présent.

- Indicateurs d'usage

Conformément à la tradition de l'IPE, la composante d'usage est élaborée à partir de trois indicateurs (Tableau 11) : d'usage public, agricole et industriel (Castelazo et al., 2007 ; Fenwick, 2010 ; Lawrence et al., 2003 ; Rentería et Pérez, 2010). Cependant, pour obtenir les indicateurs les volumes d'eau attribués aux secteurs agricole et industriel sont traditionnellement rapportés aux valeurs du PIB correspondantes. Mais présentement, le PIB n'a pas pu être collecté par secteur d'activité à l'échelle municipale, et l'ICTPC (employé précédemment pour le remplacer) ne peut servir dans le cas présent.

| Composante | Indicateurs |          | Mesures  | Sources                               |
|------------|-------------|----------|--|---------------------------------------|
| Usage      | U1          | Public   | Ressource destinée aux usages publics, rapporté au nombre d'habitant (l/hab/j)   | (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2005b, 2010b) |
|            | U2          | Agricole | Ressource destinée pour l'usage agricole, rapportée à la valeur de la production | (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2007)         |

<sup>129</sup> Cette catégorie se distingue de la précédente étant donné que les canaux en ciments sont majoritairement à l'extérieur des parcelles, alors que les *multi-compuertas* se situent dans les parcelles. Elle se distingue également de la suivante puisque, contrairement à elles, elles n'acheminent pas directement l'eau jusqu'aux racines, mais la déverse dans des sillons en terre et constitue donc malgré tout une irrigation par gravité.

|  |    |            |   |                                |
|--|----|------------|---|--------------------------------|
|  |    |            | (m <sup>3</sup> /\$/an)   |                                |
|  | U3 | Industriel | Ressource destinée aux usages industriels, rapportée au PBT industriel (m <sup>3</sup> /\$/ an) | (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2009a) |

**Tableau 11 : Indicateurs de la composante d'usage**

Par conséquent, deux autres valeurs spécifiques sont utilisées. En ce qui concerne les usages agricoles, il est remplacé par la Valeur de la Production, laquelle représente la valeur théorique des cultures en supposant que toute la production soit vendue au prix du marché (INEGI, 2018). Elle diffère du PIB en ceci que ce dernier considère les ventes et prix de vente effectifs et non théoriques. Pour les usages industriels, en revanche le PIB est remplacé par la Production Brute Totale (PBT) industrielle. Elle inclut les productions économiques effectuées par les mexicains en dehors du Mexique, alors que le PIB ne les inclut pas ; et au contraire, la PBT n'inclut pas les productions économiques effectuées par les étrangers au Mexique, alors que le PIB les inclut. A partir de ces données, les indicateurs sont élaborés en appliquant les équations suivantes :

**Équation 6 :**

$$U2 = \frac{\text{Volume agricole}}{\text{Valeur de la production}}$$

**Équation 7 :**

$$U3 = \frac{\text{Volume industriel autoalimenté}}{\text{Production Brute Totale}}$$

Où, U2 et U3 sont respectivement les Indicateurs d'usage de l'eau agricole et industriel, et où les Volumes agricoles et industriels sont données en m<sup>3</sup>/an d'eau (CONAGUA, 2010b), et la Valeur de la Production agricole (INEGI, 2007) ainsi que la Production Brute Totale (INEGI, 2009a) sont définies en \$.

En ce qui concerne l'usage industriel, plusieurs valeurs étaient égales à 0. A cela deux explications sont possibles : soit les données sont manquantes, soit l'indicateur lui-même n'est pas pertinent. Cette seconde explication est privilégiée car toutes les communes ne présentent pas d'industries auto-alimentées. Pourtant, il faut attribuer une valeur à toutes les communes pour cet indicateur. Dans ce cas, la stratégie adoptée est d'attribuer la valeur correspondant à une aptitude moyenne : cette stratégie (détaillée dans la section 2.4.1) permet de neutraliser les indicateurs sur les territoires où ils ne sont pas pertinents.

Enfin, pour l'usage domestique, après les conversions correspondantes l'indicateur est traditionnellement, d'après l'équation suivante :

**Équation 8 :**

$$U1 = \frac{\text{Volume d'approvisionnement public}}{\text{Population Totale}}$$

Où, U1 est l'indicateur d'usage d'eau domestique exprimé en l/hab/j, où le volume d'approvisionnement public donné en m<sup>3</sup>/an (CONAGUA, 2010b) est converti en l/j, et la Population Totale est donnée en nombre d'habitant (INEGI, 2005a, 2010a).

Pour cet indicateur outre les conversions, une projection a été nécessaire pour définir la population de 2009, à partir de celles de INEGI (2005a, 2010a) puisque les volumes d'eau les plus récents dataient de cette année-là. Notons que les résultats obtenus sont très élevés par rapport aux consommations établies mondialement : une analyse précise a donc été menée pour normaliser ces valeurs extrêmes (Section 2.4.1).

### 2.3.2 Indicateurs hydrologiques inclus dans la composante de ressource

Dans le calcul de l'IPE, la composante de ressource est traditionnellement élaborée à travers deux types d'indicateurs : soit des indicateurs de disponibilité de l'eau exprimés en m<sup>3</sup>/personne (Fenwick, 2010 ; Jemmali, 2013 ; Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et al., 2006) ; soit des indicateurs de volumes qui sont donc exprimés en m<sup>3</sup>/an (Castelazo et al., 2007 ; Heidecke, 2006 ; Parga et al., 2006 ; Rentería et Pérez, 2010). En l'occurrence, c'est l'approche hydrologique (exprimée en m<sup>3</sup>/an) qui est privilégiée (Tableau 12), et ce afin de séparer les indicateurs environnementaux de ceux de gestion (Section 1.4).

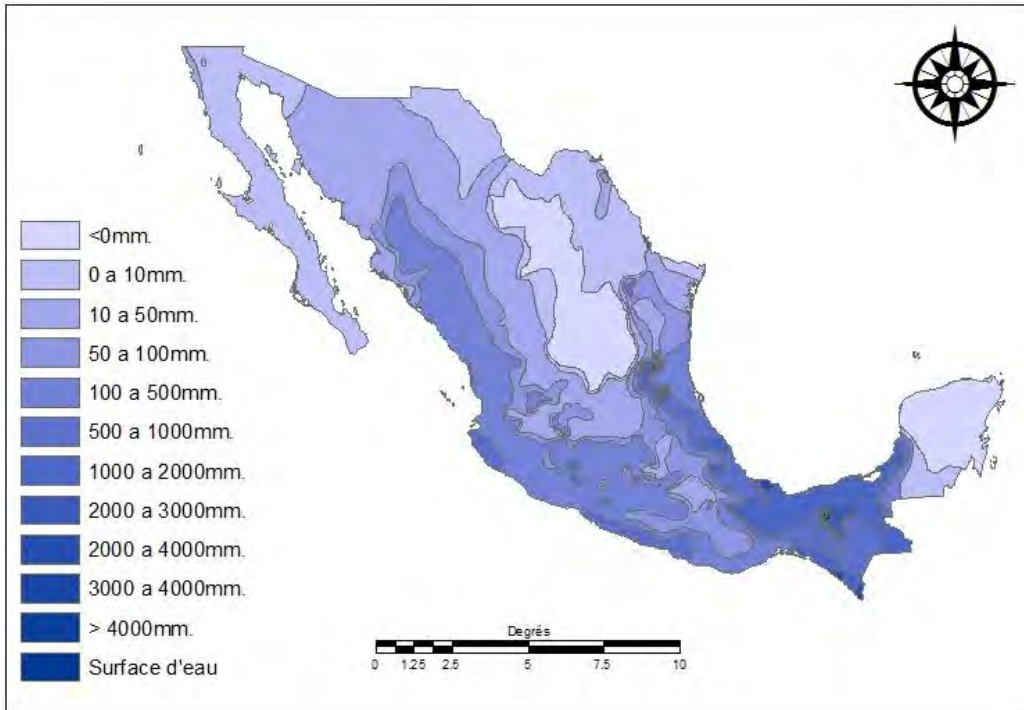
| Composante | Indicateurs |   | Mesures   | Sources                       |
|------------|-------------|---|---|-------------------------------|
| Ressource  | R1          | Quantité d'eau superficielle                    | Écoulements superficiels (mm)                                 | (Jiménez et Maderey-R., 1992) |
|            | R2          | Quantité et variabilité de l'eau météorologique | Caractérisation des climats (humidité et variabilité)         | (García, 1998)                |
|            | R3          | Quantité d'eau souterraine                      | Recharge annuelle moyenne des aquifères (hm <sup>3</sup> /an) | (CONAGUA, 2015c)              |

**Tableau 12 : Indicateurs de la composante de ressource**

Dès lors, trois indicateurs sont retenus : les volumes d'eaux météorologiques, superficielles et souterraines (Castelazo et al., 2007).

- Indicateur d'eaux superficielles (R1)

Pour établir un indicateur quantitatif concernant l'eau superficielle, c'est la Carte 7 des écoulements superficiels qui est valorisée.



Carte 7 : Ecoulements superficiels, adapté de (CONABIO, 2012)

Elle définit 12 ensembles au sein du Mexique :

- ✓ < 0mm ;
- ✓ de 0 à 10 mm ;
- ✓ de 10 à 50 mm ;
- ✓ de 50 à 100 mm ;
- ✓ de 100 à 500 mm ;
- ✓ de 500 à 1000 mm ;
- ✓ de 1000 mm à 2000 mm ;
- ✓ de 2000 mm à 3000 mm ;
- ✓ de 2000 mm à 4000mm ;
- ✓ de 3000 à 4000 mm ;
- ✓ > 4000 mm ;
- ✓ Surface d'eau.

Mais ces ensembles doivent être interprétés sous la forme d'un seul chiffre pour être utilisables en tant qu'indicateur dans la construction de l'IPE. Pour cela, le seul territoire qui est désigné sous

l'appellation « surface d'eau » est rattaché à l'ensemble « > 4000 mm ». En outre, étant donné que les extrémités de l'ensemble « de 2000 mm à 4000 mm » correspondent aux extrémités d'autres ensembles, c'est la moyenne numérique de chaque ensemble qui est utilisée pour former l'indicateur. Ainsi, l'ensemble « de 2000 mm à 4000 mm » génère une valeur de 3000 mm pour les territoires correspondants, tandis que l'ensemble « de 2000 mm à 3000 mm » génère une valeur de 2500 mm.

- Indicateur d'eaux météorologiques (R2)

La caractérisation de l'eau météorologique dans le cadre de l'IPE passe traditionnellement par deux facteurs : l'un relatif à la quantité de précipitation – annuelle ou semestrielle – et l'autre relatif à sa variabilité temporelle (Abraham et al., 2002 ; Castelazo et al., 2007 ; Cho et al., 2010 ; Lawrence et al., 2003). Ces deux facteurs sont parfois intégrés à travers deux indicateurs, mais il est notable qu'il s'agit d'une double caractérisation relative à un même phénomène, qui peut donc être associée dans un même indicateur. C'est ce qui est fait présentement en élaborant une caractérisation climatique fondée sur les deux critères mentionnés, et à partir de la classification climatique de Koppen, modifié par Garcia (2004), pour l'adapter aux conditions mexicaines.

La carte des climats, publiée sur le géoportail de CONABIO (2012), est fondée sur cette classification (García, 1998). Elle définit différents climats d'après des mesures de températures et de précipitations menées à différentes époques de l'année, et inclut donc à la fois les quantités de précipitation et leur variabilité. Pour construire l'indicateur au Mexique, étant donné que les températures ne sont pas pertinentes, il convient d'opérer certains regroupements. En effet, E. Garcia (1998) distingue cinq grands ensembles climatiques :

- ✓ climats chauds (ou semi-chauds) et humides, codés A ou AC ;
- ✓ climats tempérés (ou semi-froids) et humides, codés C ou Cb ;
- ✓ climats froids (ou très froids) et humides, codés E ;
- ✓ climats arides et secs, codés BS (qu'ils soient chauds, très chauds, froids ou très froids);
- ✓ et climats très arides et très secs, codés BW (qu'ils soient chauds, très chauds, froids ou très froids).

Mais en termes de quantités d'eaux météorologiques certains d'entre eux présentent une homogénéité, et nécessitent donc d'être regroupés. En revanche, au sein de ces grands ensembles d'autres sous-



ensembles se distinguent en fonction du degré d'humidité et de la répartition des précipitations en fonction des saisons. Ils constituent autant de cas de figures distincts pour la construction de l'indicateur qui évalue la quantité et la variabilité de l'eau météorologique (Tableau 13).

| Climats humides                  |                     |                  |                     | Catégories        |
|----------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Climats chauds                   | Climats Semi-chauds | Climats tempérés | Climats semi-froids |                   |
| Am                               | (A)C(m)             | C(m)             | Cb'(m)              | 20                |
| Am(f)                            | (A)C(m)(f)          | C(f)(m)          | Cb'(f)(m)           | 19                |
| A(f)                             | (A)Cf               | C(f)             |                     | 18                |
|                                  |                     | Cs               | Cb's                | 17                |
| Aw2(x')                          |                     | C(w2)x'          | Cb'(w2)x'           | 16 <sup>130</sup> |
| Aw2                              | (A)C(w2)            | C(w2)            | Cb'(w2)             | 15                |
| Aw1(x')                          |                     | C(w1)x'          | Cb'(w1)x'           | 14                |
| Aw1                              | (A)C(w1)            | C(w1)            | Cb'(w1)             | 13                |
| Awo(x')                          | A(C)(wo)x'          | C(wo)x'          |                     | 12                |
| Awo                              | A(C)(wo)            | C(wo)            | Cb'(wo)             | 11                |
| Climats secs ou arides           |                     |                  |                     |                   |
| Très chauds                      | Chauds              | Froids           | Très froids         |                   |
|                                  | BShs                | BSks             |                     | 10                |
|                                  |                     | BS1k             |                     | 9                 |
| BS1(h')w                         | BS1hw               | BS1kw            |                     | 8                 |
| BS1(h')(x')                      | BS1h(x')            | BS1k(x')         |                     | 7                 |
|                                  |                     | BSok             |                     | 6                 |
| BSo(h')w                         | BSohw               | BSo kw           |                     | 5                 |
| BSo(h')(x')                      | BSo h(x')           | BSo k(x')        |                     | 4                 |
| Climats très secs ou très arides |                     |                  |                     |                   |
| Très chauds                      | Chauds              | Froids           | Très froids         |                   |
| BW(h')s                          | BWhs                | BWks             |                     | 3                 |
| BW(h')w                          | BWhw                | BWkw             |                     | 2                 |
| BW(h')(x')                       | BWh(x')             | BWk(x')          |                     | 1                 |

**Tableau 13 : Regroupements opérés sur les ensembles climatiques de Garcia (1998), en fonction des quantités et de la variabilité de l'eau météorologique <sup>131</sup>**

<sup>130</sup> Deux autres types de climats interviennent au Mexique, sur des territoires très restreints : E(t)CHw et EFHw. Ils correspondent à des climats froids et humides, localisés au-dessus de 1500mètres d'altitudes et riches en eau, ils se rapprochent des climats humides semi-froids, classés Cb'(w2)x' par E. Garcia (1998).

Concrètement, la codification des sous-ensembles de Garcia (1998), classe les climats de 0 à 2 en fonction de leur degré d'humidité (2 étant le plus humide, et 0 le moins humide). Et cinq sous-catégories sont définies en associant des critères de quantité et de variabilité des précipitations, avec les symboles suivants :

- ✓ m, pluies abondantes toute l'année (>200cm) ;
- ✓ f, pluies abondantes toute l'année (entre 150 et 200cm) ;
- ✓ s, saison humide en hiver (trois fois plus de pluie pendant le mois le plus humide que pendant le mois le plus sec) ;
- ✓ w, saison humide en été (dix fois plus de pluie pendant le mois le plus humide que pendant le mois le plus sec) ;
- ✓ wx', saison humide en été, mais des pluies sont aussi notables en été (l'effectivité des précipitations étant supérieure à w, et inférieure à x' ;
- ✓ x', pluies faibles (intenses mais peu fréquentes) toute l'année.

Grâce à ces critères, 20 catégories ont été définies pour caractériser l'eau météorologique au Mexique. Elles ont été chiffrées de 1 à 20, de la plus humide et moins variable, à la moins humide et plus variable. De sorte que ces 20 catégories déterminent le niveau d'aptitude (Section 2.4.1).

- Indicateur d'eaux souterraines (R3)

Cet indicateur est souvent élaboré à partir de données de disponibilité, ou d'extraction, d'approvisionnement en eaux souterraines (Cullis et Gorgens, 2006 ; Parga et al., 2006 ; Rentería et Pérez, 2010). Mais d'après l'état de l'art et les objectifs (Sections 1.1 et 1.4) ces deux concepts posent question dans le cadre de la composante de ressource. En effet, l'extraction dépend certes des quantités de ressource existantes, mais aussi – et même surtout – des capacités technologiques et économiques investis dans cette action (Fenwick, 2010). Et de la même manière, la « disponibilité » d'eaux

---

<sup>131</sup> Dans les codes employés par E. Garcia (1998), le 0 est remplacé par un o. C'est pourquoi la même transformation a été conservée ici pour présenter les sous-types de climats.

souterraines est définie par des facteurs hydrologiques mais aussi par des facteurs de gestion. Au Mexique la *disponibilidad media anual del agua de subsuelo*<sup>132</sup> est ainsi définie comme :

« *volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas* » (Estados Unidos Mexicanos, 2000).

Ce faisant, ces indicateurs relatifs à l'extraction parlent plus de capacité que de ressource. En outre, les valeurs obtenues sont corrélées avec les indicateurs d'usages, élaborés d'après les concessions d'eau qui déterminent (en théorie) directement les extractions. Enfin, il est notable qu'au Mexique, les mesures de disponibilité servent à établir la condition « surexploité » – ou non – des aquifères, condition qui entre présentement dans la composante d'environnement (Section 2.3.3). Dans le cas présent, au vu de ces constats, l'indicateur relatif aux eaux souterraines est construit à partir d'autres mesures, excluant l'extraction. Parmi les données collectées, la plus pertinente s'est avérée être celle de la recharge moyenne annuelle totale. Elle correspond aux quantités d'eaux qui s'infiltrent (par différents moyens) depuis la surface jusqu'à l'aquifère (Estados Unidos Mexicanos, 2000).

D'après la définition de la recharge, les aquifères qui ont de fortes recharges ne sont pas plus remplis que les autres, mais ils se remplissent plus sûrement. A ce titre elle caractérise la variabilité de ces ressources. Castelazo et al. (2007) parle d'instabilité, tandis que Sullivan et al. (2003) fait référence à la variabilité des ressources. Mais malgré les différences de vocabulaire, et même s'il est plutôt employé dans le cadre de l'indicateur météorologique, ce concept est aussi essentiel pour l'indicateur d'eau souterraine<sup>133</sup>. En l'occurrence, les mesures de recharge permettent de l'évaluer. En revanche, il est notable que cette donnée ne dit rien des quantités d'eau présentes à un temps voulu dans les aquifères. Cette mesure quantitative serait donc importante à inclure dans le calcul de l'IPE ; mais à l'heure actuelle aucune donnée publiée uniformément pour tout le territoire mexicain ne permet de le faire. Comme le suggèrent Lawrence et al. (2003), le manque d'information conduit présentement à l'exclusion de cet indicateur qu'il faudra envisager dans des études à venir. Par conséquent, l'évaluation des eaux souterraines est présentement intégrée dans l'IPE sous la seule forme de la recharge moyenne

---

<sup>132</sup> « Disponibilidad anual promedio de agua subterránea »

<sup>133</sup> Même en ce qui concerne les écoulements superficiels, il pourrait être utile, mais faute d'antécédent et de donnée correspondante, cette alternative a été exclue de la présente étude.

annuelle totale. Mesurée en hm<sup>3</sup>/an pour tous les aquifères du territoire mexicain, les données correspondantes ont une forme directement exploitable et une pertinence – certes partielle mais néanmoins réelle – pour le calcul de l'IPE.

### 2.3.3 *Sélection des indicateurs de la composante d'environnement*

Contrairement aux composantes précédentes, les indicateurs environnementaux employés pour le calcul de l'IPE sont nombreux et varient notablement à travers la littérature (Section 1.3). La complexité et les connaissances croissantes à propos des mécanismes considérés, ainsi que les coûts des données rendent laborieuse leur élaboration. En accord avec Garriga et Foguet (2010b) – qui excluent les données de capacités – Lawrence et al. (2003), l'analyse s'opère sur deux ensembles : l'un relatif à la préservation environnementale et l'autre aux qualités hydrologiques.

- Indicateur de préservation environnementale

La préservation environnementale peut être mesurée à partir de données diverses et variées, de sorte que pour calculer l'IPE, toute la question réside dans la rationalisation des critères et de la méthode d'analyse. Dans ce contexte, il est notable que les données de biodiversité et celles de dégradation ou de changement d'USV, qui sont employées par plusieurs auteurs pour construire l'IPE (Section 1.3) représentent chacune à leur manière l'état de préservation/dégradation des habitats naturels face aux actions conjointes de l'homme et du changement climatique. Par conséquent, seul le changement d'USV est employé dans la présente étude : cette dynamique, particulièrement étudiée dans l'aide à la prise de décision, impacte spécifiquement le fonctionnement de l'hydrosystème (Chabrilat, 2015), alors que l'analyse de la biodiversité l'illustre plus qu'elle ne l'impacte. De même, l'analyse de l'érosion des sols fournit elle aussi des indications intéressantes concernant le fonctionnement de l'hydrosystème (Chabrilat, 2015). Or, si elle était incluse dans les données d'USV de 1997, elle ne l'est plus en 2012 (INEGI, 1999, 2014a). Dès lors, comme le font plusieurs études de l'IPE (Garriga et Foguet, 2010b ; Manandhar et al., 2012 ; Sullivan et al., 2006) un indicateur d'érosion est ajouté au précédent. Enfin, à l'heure actuelle, la surexploitation des aquifères constitue une problématique de taille au Mexique

(SEMARNAT-CONAGUA, 2015a) qui mérite d'être intégrée dans l'IPE comme le mentionnent Rentería et Pérez (2010). Au vue de ces remarques, la préservation environnementale est finalement évaluée à travers trois indicateurs : d'érosion physique des sols, de changements d'usage des sols et de la végétation, et de surexploitation des aquifères (Tableau 14).

| Composante                    | Indicateurs |                                       | Mesures  | Sources              |
|-------------------------------|-------------|---------------------------------------|--|----------------------|
| Environnement :               | M1          | Erosion physique des sols             | Erosion éolienne et hydrologique des sols en fonction de leur forme et de leur intensité | (SEMARNAT, 2004)     |
|                               | M2          | Dégradation de la couverture végétale | Caractérisation du changement d'USV  | (INEGI, 1998, 2013b) |
| Préservation environnementale | M3          | Surexploitation des aquifères         | Taux de surexploitation des eaux souterraines  | (CONAGUA, 2015c)     |

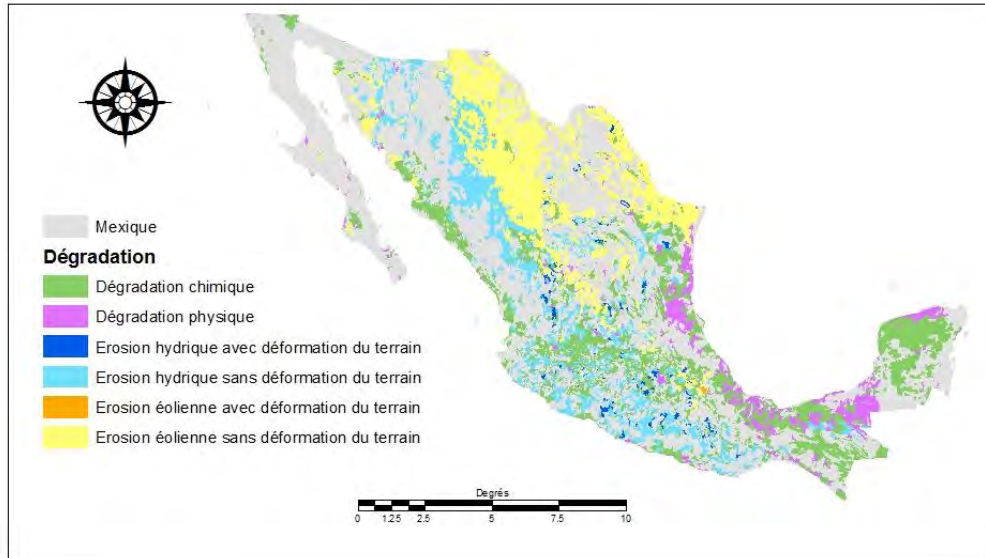
**Tableau 14 : Indicateurs de préservation environnementale, inclus dans la composante d'environnement**

L'indicateur d'érosion (M1) est élaboré à partir de la carte de dégradation du sol publiée sur CONABIO (2012) qui présente des données d'érosion éolienne et hydrologique, ainsi que de dégradation physique et chimique pour l'ensemble du territoire mexicain. Présentement, seules les données d'érosion sont employées pour éviter les corrélations avec les autres indicateurs de l'IPE (M2, Q2 et Q3). En outre, plus que le type d'érosion détectée, ce sont les formes et les intensités du phénomène qui sont intéressantes pour la construction de l'indicateur. Après avoir exclu les données physiques et chimiques, l'indicateur est donc construit à partir de ces deux critères recensés dans les données (Tableau 15). Afin de de lui donner une forme valorisable sur TerrSet, les neuf catégories ainsi définies sont chiffrées de 1 à 9 : 1 étant l'érosion la plus lourde d'impact, et 9 une érosion négligeable. Sous cette forme, les neuf catégories déterminent le niveau d'aptitude (Section 2.4.1).

| Forme                       | Intensité | Catégories |
|-----------------------------|-----------|------------|
| Avec déformation de terrain | Extrême   | 1          |
|                             | Forte     | 2          |
|                             | Moyenne   | 3          |
|                             | Faible    | 4          |
| Sans déformation de terrain | Extrême   | 5          |
|                             | Forte     | 6          |
|                             | Moyenne   | 7          |

|              |        |   |
|--------------|--------|---|
|              | Faible | 8 |
| Sans érosion | -      | 9 |

**Tableau 15 : Typologie employée pour élaborer l'indicateur d'érosion (M1)**



**Carte 8 : Carte de dégradation des sols, adapté de (CONABIO, 2012)**

L'indicateur de dégradation de la couverture végétale (M2) est quant à lui construit à travers une analyse de changement d'usage des sols et de la végétation opérée en comparant les données de l'INEGI (1998, 2013)<sup>134</sup>.

En l'occurrence, les cartes de l'INEGI comprennent de très nombreuses catégories de végétation et d'usage des sols, qui ne sont d'ailleurs pas toutes uniformisées également entre les deux années considérées. Dès lors, plusieurs regroupements sont opérés. En plus de ceux qui uniformisent les catégories pour les deux bases de données (une Annexe 1 présente tous les regroupements), il convient de déterminer les différents types de dégradation (Chabrillat, 2015 ; Nuñez et al., 2015). En effet certaines transformations sont équivalentes alors que d'autres ne sont pas assimilables à des

<sup>134</sup> De nombreuses méthodes ont été développées pour l'analyse d'image satellites, mais la présente étude valorise préférentiellement les données officielles (Section 1.4.1 et Section 2.2).

dégradations<sup>135</sup>. Cette analyse engendre six types de dégradations qui correspondent à autant de catégories (Tableau 16). Chiffrées de 1 à 6 en fonction du type de dégradation qu'elles représentent, les six catégories déterminent le niveau d'aptitude de l'indicateur (Section 2.4.1).

| USV 1993   | USV 2012   | Type de dégradation  | Catégories |
|--|--|--|------------|
| Forêt, <i>Matorral</i> <sup>136</sup> , Agriculture, Pâturage, Ecosystème aquatique, Zone humide ou Autre type de végétation | Zones bâties                                       | Perte temporaire ou pérenne de la fonction productive du sol | 1          |
|  | Surface sans végétation                            |  |            |
| Forêt et Forêt basse, <i>Matorral</i> désertique et Chaparral (primaires et secondaires) ou Autre type de végétation         | Agriculture  | Déforestation et défrichage                                  | 2          |
|  | Pâturage   |  |            |
| Pâturage   | Agriculture  | Perte de pâturage  | 3          |
| Pâturage primaire  | Pâturage secondaire                                | Dégradation de pâturage                                      | 4          |
| Forêt et Forêt basse primaire  | Forêt et Forêt basse secondaire                    | Dégradation de la couverture arborée ou arbustive            | 5          |
| <i>Matorral</i> désertique et Chaparral primaire   | <i>Matorral</i> désertique et Chaparral secondaire |  |            |
| Autre type de changement et maintien de la végétation  |  | Conservation ou récupération de la végétation                | 6          |

**Tableau 16 : Analyse des changements d'USV employée pour construire M2 (CONABIO, 2012)**

Enfin, l'indicateur de surexploitation des aquifères (M3) est élaboré à partir des données de CONAGUA (2015b). En accord avec la législation correspondante (Estados Unidos Mexicanos, 2000), la

<sup>135</sup> Il peut y avoir de fait des processus de récupération du couvert végétal, ou encore de transformation.

<sup>136</sup> « végétation arbustive associée à un climat sec »

surexploitation est traditionnellement définie en fonction de la disponibilité des eaux souterraines, laquelle est calculée en soustrayant la décharge naturelle compromise et le volume d'eau souterraine mise en concession et inscrit dans le REPDA à la recharge moyenne annuelle totale (Équation 9) :

**Équation 9 :**

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

Avec DAS, la disponibilité annuelle moyenne de l'eau souterraine dans une unité hydrogéologique ( $\text{hm}^3/\text{an}$ ) ; Rt, la recharge moyenne annuelle totale ; DNCOM, la décharge naturelle compromise ( $\text{hm}^3/\text{an}$ ) ; VCAS, le volume d'eau souterraine mise en concession et inscrit dans le REPDA ( $\text{hm}^3/\text{an}$ ).

Mais (Omar, 2015) signale que ces définitions ne sont pas entièrement satisfaisante puisqu'elles ne prennent pas en compte le rôle que joue les aquifères dans la préservation des écosystèmes. Dans le cadre de l'évaluation de la préservation environnementale, cette remarque est particulièrement significative. C'est pourquoi, le calcul de l'indicateur M3 reprend présentement les mêmes facteurs que ceux employés par la *Norma Oficial Mexicana*<sup>137</sup>, mais adapte la formule.

De fait, la décharge naturelle compromise correspond aux volumes d'eau qui ne font que transiter par l'aquifère pour aller alimenter les écoulements en aval (Estados Unidos Mexicanos, 2000). En soustrayant ces volumes à ceux de recharge de l'aquifère, c'est donc la recharge effective de l'aquifère qui est calculée. Dès lors, la disponibilité est traditionnellement calculée en comparant cette donnée avec les concessions au moyen d'une soustraction. Ce faisant, la méthode aboutit à une classification en trois catégories d'exploitation (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a) :

- ✓ si  $\text{DAS} > 0$ , la recharge est supérieure à aux concessions et l'aquifère est déclaré « libre » ;
- ✓ Si  $\text{DAS} = 0$ , la recharge est égale à aux concessions et l'aquifère est déclaré « sans disponibilité » ;
- ✓ si  $\text{DAS} < 0$ , la recharge est inférieure aux concessions et l'aquifère est déclaré « surexploité ».

---

<sup>137</sup> « Norme Officielle Mexicaine »



En appliquant un quotient (à la place de la soustraction), la comparaison demeure, mais les résultats autorisent des niveaux d'interprétation supplémentaires :

- ✓ si  $(Rt - DNCOM) / VCAS = 2$ , la recharge est deux fois supérieure aux concessions ;
- ✓ si  $(Rt - DNCOM) / VCAS = 3/2$ , la recharge est de moitié supérieure aux concessions ;
- ✓ si  $(Rt - DNCOM) / VCAS = 1$ , la recharge est égale aux concessions ;
- ✓ si  $(Rt - DNCOM) / VCAS = 2/3$ , la recharge est de moitié inférieure aux concessions ;
- ✓ si  $(Rt - DNCOM) / VCAS = 1/2$ , la recharge fait la moitié des concessions, etc.

Ce faisant, le quotient ouvre des possibilités de discussions concernant notamment la préservation des écosystèmes. Au vu de ces remarques, M3 est défini à travers l'Équation 10<sup>138</sup> :

**Équation 10 :**

$$M3 = 1 - VCAS / (Rt - DNCOM)$$

Avec M3, l'indicateur d'exploitation des eaux souterraines ; Rt, la recharge moyenne annuelle totale ; DNCOM, la décharge naturelle compromise (hm<sup>3</sup>/an) ; VCAS, le volume d'eau souterraine mise en concession et inscrit dans le REPDA (hm<sup>3</sup>/an).

- Indicateurs de l'analyse qualitative de l'eau

Comme la section 2.2 l'a indiqué, les données publiées au Mexique sur la qualité de l'eau posent question de plusieurs points de vue, ce qui complique l'élaboration d'indicateurs spécifiques et précis. Suivant la proposition de Lawrence et al. (2003), l'analyse est présentement opérée dans différents types d'indicateurs. Les indicateurs de *Water quality* sont élaborés à partir de diverses analyses physiques et chimiques de la ressource, tandis que ceux de *Water stress* (abordée du point de vue qualitatif) sont élaborés en évaluant les quantités de fertilisants ou de pesticides employés dans l'agriculture. En outre, il est notable qu'un indicateur de traitement des eaux usées est aussi inclus par Parga et al. (2006), Cho

<sup>138</sup> L'inverse du quotient est présentement utilisé et soustrait à 1 afin de conserver dans les résultats la séparation positif/négatif obtenue avec la formule de Estados Unidos Mexicanos (2000) : grâce à cela les valeurs positives attestent d'une recharge supérieure aux extractions, tandis que les valeurs négatives attestent d'une recharge inférieure aux extractions.

et al. (2010) et Fenwick (2010) au Mexique, alors que Lawrence et al. (2003) ne l'incluent pas. Etant donné l'importance de cette problématique au Mexique et notamment à Chihuahua (Introduction, et Section 2.1), il est présentement intégré dans l'IPE, sous la forme d'un second indicateur de stress en eau (Tableau 17).

| Composante                          | Indicateurs |  | Mesures   | Sources   |
|-------------------------------------|-------------|--|---|---|
| Environ-<br>nement :<br><br>Qualité | Q1          | Water quality :<br>Qualité chimique de<br>l'eau  | ICA superficiel   | (CONAGUA, 2015d)                                  |
|                                     | Q2          | <i>Water stress</i> : dû aux<br>usages agricoles | Erosion chimique des sols<br>associée aux pratiques agricoles | (INEGI, 2014a ;<br>SAGARPA, 2012)                 |
|                                     | Q3          | <i>Water stress</i> : dû aux<br>usages urbains   | Eaux résiduelles traitées (%)                                 | (CONAGUA, 2010 ;<br>CONAGUA et<br>SEMARNAT, 2015) |

**Tableau 17 : Indicateurs de qualité de la ressource**

Tout d'abord, pour construire l'indicateur Q1 la *Water quality* superficielle est évaluée d'après l'ICA. Publié par CONAGUA (2015) et élaboré à travers un AMC (Section 1.1.3), il repose sur cinq critères/facteurs :

- ✓ demande biochimique en dioxygène à cinq jours ;
- ✓ demande chimique en oxygène ;
- ✓ solides en suspension ;
- ✓ coliformes fécaux ;
- ✓ toxicité aigüe.

Chacune de ces mesures est ensuite normalisée sur une échelle de contamination établie en fonction des usages relatifs aux eaux superficielles. Cette échelle comprend cinq catégories (CONAGUA, 2016b) :

- ✓ excellente ;
- ✓ bonne ;
- ✓ acceptable ;
- ✓ contaminée ;
- ✓ et fortement contaminée.

Une fois normalisés, ces facteurs sont agrégés pour former l'ICA. En l'occurrence, l'agrégation prend la forme d'une AMC dite non compensatoire<sup>139</sup> en conservant le niveau de contamination maximale pour chaque point de contrôle. De cette manière, l'ICA constitue un indicateur intéressant pour la construction de l'IPE. Néanmoins, la digitalisation des données relatives à l'état de Chihuahua révèle que le suivi est trop ponctuel pour être représentatif et interprété à l'échelle du territoire considéré<sup>140</sup> (Illustration 3, Section 2.2.2). Pour valoriser ces données dans l'IPE, tout en transcrivant cette limite, l'indicateur a été construit à l'échelle municipale en fonction de la qualité signalée par l'ICA, mais aussi de la quantité des données de contamination (Tableau 18). Concrètement, pour chaque municipalité le plus fort degré de contamination est retenu pour définir la dimension qualitative de l'indicateur. Quant à la dimension quantitative elle est construite comme une proportion de points de contrôle contaminés et fortement contaminés par rapport au nombre total de point de contrôle dans la municipalité : ce faisant, si un seul point de contrôle est disponible sur l'ensemble de la municipalité, cette proportion est intégrée à la catégorie 3 (soit une valeur moyenne) afin de nuancer le facteur qualitatif. Les deux dimensions sont ensuite additionnées entre elles pour obtenir l'indicateur qui est donc échelonné entre 2 et 10. Cet échelonnage détermine directement le niveau d'aptitude de l'indicateur.

| Contamination de la ressource (ICA) |   | Proportion de points de contrôle contaminés |   |
|-------------------------------------|---|---|---|
| Fortement contaminée                | 1 | 4/5 à 1                                     | 1 |
| Contaminée                          | 2 | 3/5 à 4/5                                   | 2 |
| Acceptable                          | 3 | 2/5 à 3/5                                   | 3 |
| Bonne qualité                       | 4 | 1/5 à 2/5                                   | 4 |
| Excellente                          | 5 | 0 à 1/5                                     | 5 |

**Tableau 18 : Construction de l'indicateur de qualité chimique de l'eau (Q1) à l'échelle municipale**

Parallèlement à ces mesures concernant les ressources superficielles, il serait intéressant d'intégrer une évaluation chimique relative aux eaux souterraines. Néanmoins l'ICA correspondant n'est construit qu'en fonction de la salinité de la ressource, et sans prendre en compte ses différents usages CONAGUA

<sup>139</sup> Pour plus de détail cf (OECD et JRC, 2008)

<sup>140</sup> En particulier le traçage d'iso lignes est exclu, faute de représentativité de l'échantillon.

(2015). Etant données ces restrictions, l'indicateur a été exclu de la présente étude, qui insiste par ailleurs sur cette question du point de vue social (Section 3.4)<sup>141</sup>.

En ce qui concerne à présent, le *Water stress* associé aux pratiques agricoles, il n'existe pas de données chiffrées spécifiquement liées à l'utilisation de fertilisants ou d'insecticides au Mexique (Section 2.2). Face à ce constat, l'université de Chapingo attribue à toutes les surfaces agricoles irriguées un indicateur d'érosion chimique léger ou modéré (Carte 8). De cette manière, les espaces agricoles sont distingués négativement du reste du territoire, en termes d'intrants. Une démarche similaire est présentement adoptée pour construire l'indicateur (Q2). A partir d'une révision de la littérature spécialisée, il apparaît que deux critères déterminent fondamentalement l'impact des intrants agricoles sur l'environnement, à savoir : le type de produit utilisé, et la quantité administrée (Babut et al., 2013 ; Legarreta et al., 2002). Dès lors, pour signaler négativement les espaces agricoles en accord avec ce constat, l'indicateur est défini à partir de ces deux dimensions et échelonné entre 2 et 8 en faisant la somme des scores obtenus pour chacune d'entre elles (Tableau 19). Cet échelonnage détermine directement le niveau d'aptitude de l'indicateur.

| Type de produit   |   | Quantités de produit  |   |
|---|---|---|---|
| Produits polluants signalés comme dangereux, interdits par les normes internationales | 1 | Agriculture qui ne tient pas compte des recommandations de quantités                                    | 1 |
| Produits polluants autorisés dans les normes internationales                          | 2 | Agriculture respectant les recommandations de quantités   | 2 |
| Produits peu polluants  | 3 | Agriculture employant peu d'intrants polluants (rationalisation, préventions et contrôles parcellaires) | 3 |
| Produits non polluants  | 4 | Agriculture sans intrant polluant   | 4 |

**Tableau 19 : Construction de l'indicateur de *Water stress*, associé aux contaminations agricoles**

<sup>141</sup> Comme pour les quantités d'eau souterraines (Section 2.3.2), le manque d'information conduit présentement à l'exclusion de cet indicateur en accord avec les recommandations de Lawrence et al. (2003).

A travers un tel indicateur, il est intéressant de distinguer les superficies irriguées et non irriguées : puisque les quantités d'intrants varient a priori avec les différentes temporalités et intensités des activités agricoles menées sur ces territoires. En l'occurrence, la carte d'USV de 2012 (CONABIO, 2012) permet de les distinguer à ce niveau : les superficies irriguées sont donc signalées comme « agriculture ne tenant pas compte des recommandations de quantités », alors que les superficies non irriguées sont considérées comme « agricultures employant peu d'intrants polluants ». En revanche, dans les deux cas le type de produit est ramené à « produit polluants signalés comme dangereux voire interdits par les normes internationales » pour insister sur ce point. Dès lors, un indicateur unique de pauvreté en eau extrême (2) est défini pour tous les espaces agricoles irrigués, tandis qu'un indicateur de pauvreté élevée (4) est défini pour les espaces d'agriculture saisonnière. Une telle démarche, met de fait l'accent sur cette problématique importante et sur les différences qui existent en fonction des pratiques.

Enfin, l'indicateur de *Water stress* associé aux pollutions urbaines (Q3) est simplement élaboré en calculant le pourcentage total d'eaux usées traitées. Pour cela, outre les conversions nécessaires, deux types de données sont converties et utilisées pour établir l'Équation 11.

**Équation 11 :**

$$Q3 = \frac{\text{Volume d'eau résiduelle traitée} * 100}{\text{Volume d'approvisionnement public}}$$

Avec Q3, indicateur de traitement des eaux usées ; Volume d'eau résiduelle traitée, élaboré à partir du débit d'eaux résiduelles traitée publié par CONAGUA & SEMARNAT (2015) en l/s et converti en m<sup>3</sup>/an en postulant que les stations d'épuration sont opérées en continu tous les jours de l'année ; Volume d'approvisionnement public, publié par (CONAGUA, 2010b) en m<sup>3</sup>/an.

En l'occurrence pour cet indicateur plusieurs valeurs ainsi obtenus se sont révélées incongrues (comprises entre 110% et 300%). Ces valeurs ont donc été remplacées par la valeur moyenne observée sur l'échantillon à l'échelle municipale.

Afin d'obtenir les résultats finaux de l'IPE, les 19 indicateurs élaborés sont normalisés puis agrégés au sein des cinq composantes de l'indice à travers des opérations d'EMC. De fait, la phase de normalisation est la même dans tous les calculs de l'IPE-SIG. Mais comme l'expose la section suivante, plusieurs alternatives de spatialisation et d'agrégation sont adoptées pour former finalement une modélisation de l'IPE-SIG.

## **2.4 Evaluation multicritère (étape par étape) et modélisation**

Dans le cadre des réflexions sur l'interdisciplinarité et la représentativité territoriale des diagnostics de pauvreté en eau, l'IPE est présentement calculé sous un format raster, et au moyen d'une EMC (Section 1.4.2). Pour cela, elle emploie deux logiciels de traitement SIG : ArcGis et TerrSet. Le premier sert à analyser les données environnementales et hydrologiques ainsi qu'à spatialiser les données exclusivement statistiques, et ce afin d'obtenir la cartographie associée à chaque indicateur. Toutes les cartes sont ensuite converties en format raster – toujours grâce à ArcGis – pour être ensuite exploitables sous TerrSet. Ce second logiciel sert finalement à opérer l'EMC à travers les phases de normalisation et d'agrégations. Trois cartes d'IPE-SIG sont ainsi élaborées : la méthode « *FUZZY* » ne varie pas d'un calcul à l'autre, mais deux alternatives de spatialisation et d'agrégation des indicateurs sont adoptées.

### *2.4.1 Standardisation des données et analyses « FUZZY »*

La normalisation de l'IPE traditionnellement opérée à travers une analyse Min-Max, est présentement opérée à travers une analyse « *FUZZY* ». Celle-ci repose sur le concept d'aptitude, implique de définir pour chaque indicateur des seuils d'aptitude et de sélectionner la fonction d'aptitude correspondante (Section 1.4.2). De fait, le concept d'aptitude va dans le sens de fixer les seuils de normalisation afin de comparer entre elles différentes analyses. C'est pourquoi dans le cas présent, les indicateurs sont normalisés en employant tant que possible des seuils réutilisables dans des calculs régionaux de l'IPE effectués en dehors du Mexique.

Avec le corpus de cette étude, trois cas de figures se distinguent les uns des autres. Certains indicateurs prennent – en l'état – des formes telles que les seuils sont relativement évidents et que la normalisation réside dans une opération statistique particulièrement simple. En revanche, pour d'autres indicateurs, il convient de pré-analyser les indicateurs en détail, pour déterminer leurs degrés d'aptitude. Parmi eux deux types d'analyses se distinguent : celles qui ont des fondements internationaux, et celles qui n'en bénéficient pas. Cette section précise tour à tour ces différents cas de figure en spécifiant pour chaque indicateur les seuils et les fonctions retenues pour leur normalisation.

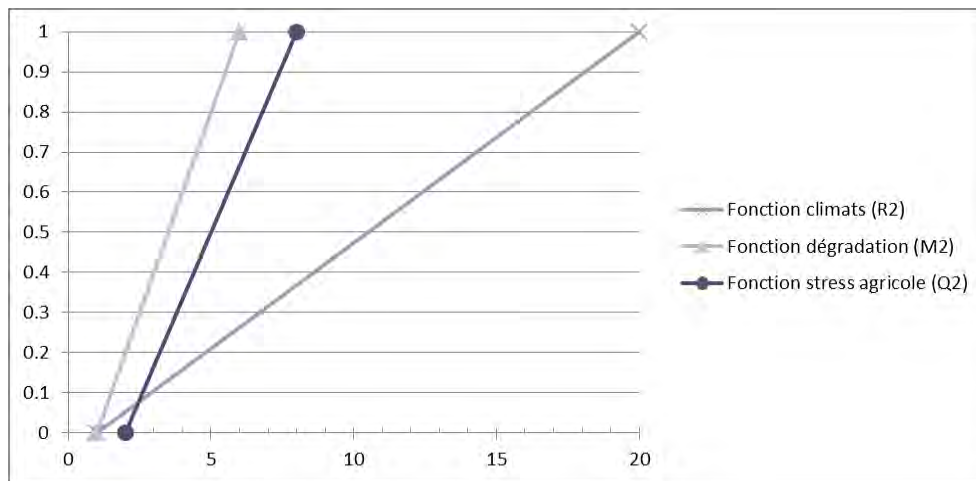
- Indicateurs présentés sous forme de catégorie et de pourcentage qui ne requiert pas de pré-analyse majeure pour leur normalisation

Certains indicateurs présentement employés pour calculer l'IPE se présentent sous la forme de pourcentage ou de catégories. A ce titre, et dans la perspective «FUZZY», ils sont *self-normalised* (Section 1.3.2) : leur degré d'aptitude, et les seuils correspondant sont donc évidents (Tableau 20).

| Indicateur |   | Ensembles d'aptitudes |               |   |
|------------|---|-----------------------|---------------|---|
|            |   | Ensemble non-apte     | Ensemble apte | Source  |
| R2         | Quantité et variabilité de l'eau météorologique | 1                     | 20            | (García, 2004)                                |
| M1         | Erosion des sols                                | 1                     | 9             | (SEMARNAT, 2004)                              |
| M2         | Dégradation de la couverture arborée            | 1                     | 6             | (Chabrillat, 2015 ; Nuñez López et al., 2015) |
| Q1         | Qualité chimique                                | 2                     | 10            | (CONAGUA, 2015d)                              |
| Q2         | Stress liés aux usages agricoles                | 2                     | 8             | (Babut et al., 2013 ; Legarreta et al., 2002) |
| A1         | Accès à l'irrigation                            | 1                     | 5             | (Frenken, 2005 ; Parry et al., 2007)          |
| A2         | Accès eau domestique                            | 0-10%                 | 90-100%       | -   |
| A3         | Accès assainissement                            |                       |               | -   |
| Q3         | Stress lié aux usages domestiques               |                       |               | -   |

**Tableau 20 : Seuils des indicateurs élaborés comme des catégories ou des pourcentages**

Par définition, les catégories sont formées comme des échelles. Présentement, elles ont été numérotées pour évoluer de manière proportionnelle avec l'aptitude (Section 2.3). Par conséquent, l'analyse « FUZZY » est élaborée à travers une fonction linéaire croissante dont les extrémités correspondent aux plus petites et plus grandes catégories. Cette fonction permet de respecter l'échelle initiale : elle la transcrit fidèlement sur la même échelle que les autres indicateurs (Graphique 2).



**Graphique 2 : Exemple de fonctions d'appartenance employées pour les indicateurs catégoriels**

Les indicateurs A2, A3 et Q2 sont quant à eux donnés sous forme de pourcentages. A ce titre, ils sont aussi pré-échelonnés, sur une échelle allant de 0 à 100. Etant donnée l'échelle commune d'élaboration de A2 et A3, qui distingue les espaces urbains et ruraux (Section 2.3.1), il convient de conserver ces deux seuils pour intégrer la grande variété des cas de figures. Et dans le cas de Q3, les difficultés associées au suivi de cette problématique importante (Section 2.2.3) incitent aussi à conserver une amplitude maximale. Ainsi, pour les trois indicateurs concernés, les seuils adoptés restent 0 et 100, et la fonction adopte un comportement croissant. Néanmoins, c'est une fonction sigmoïdale qui est présentement employée (Section 1.4.2). De fait, les connexions infrastructures associées aux trois indicateurs considérés sont en constante évolution : des logements se construisent tandis que d'autres se vident, et la conduction de la ressource varie donc dans le temps, et en fonction des dynamiques démographiques. Par conséquent, la valeur maximale est rarement atteinte. Dès lors, une fois dépassés les 90% de connexion aux réseaux ou de traitement des eaux usées, la variation de l'aptitude peut être moins forte. De même, il semble que 10% de connexion ou de traitement restent notablement



insuffisant, et qu'il s'agit déjà d'une aptitude infime. La fonction sigmoïdale permet justement de transcrire cette réalité.

Finalement, seuls trois indicateurs environnementaux (R1, R3 et M3) ne peuvent être normalisés au moyen de ces deux stratégies (leur cas particuliers est développé dans le dernier point de cette section). Mais en ce qui concerne les indicateurs socio-économiques, aucun indicateur de capacité ou d'usage ne répondent aux critères mentionnés. Il convient donc de définir les seuils correspondant ; parmi ces indicateurs certains se distinguent par la possibilité d'employer des seuils valables partout dans le monde.

- Indicateurs normalisables à partir de données internationales

Trois indicateurs de capacité et un indicateur d'usage présentement sont construits à partir de méthodes standardisées à l'échelle internationale. En conséquence, il est possible de comparer les valeurs obtenues en fonction des bases de données actualisées mondialement par des organismes internationaux tels que UN (2011), la Banque Mondiale (2013, 2016) ou l'OMS (Howard & Bartram, 2003). Ceux-ci publient en particulier des synthèses reprenant les valeurs clés relatives à ces indicateurs. Grâce à cela, la normalisation est opérée à travers des fonctions dites « définies par l'utilisateur », employant les valeurs maximales, moyennes et minimales des données. Deux des quatre indicateurs (C1b et C2) emploient directement les seuils et les fonctions correspondants<sup>142</sup>, et dans le cas des deux autres cas (U1 et C3), cette stratégie est légèrement adaptée pour répondre à la spécificité des données (Tableau 21).

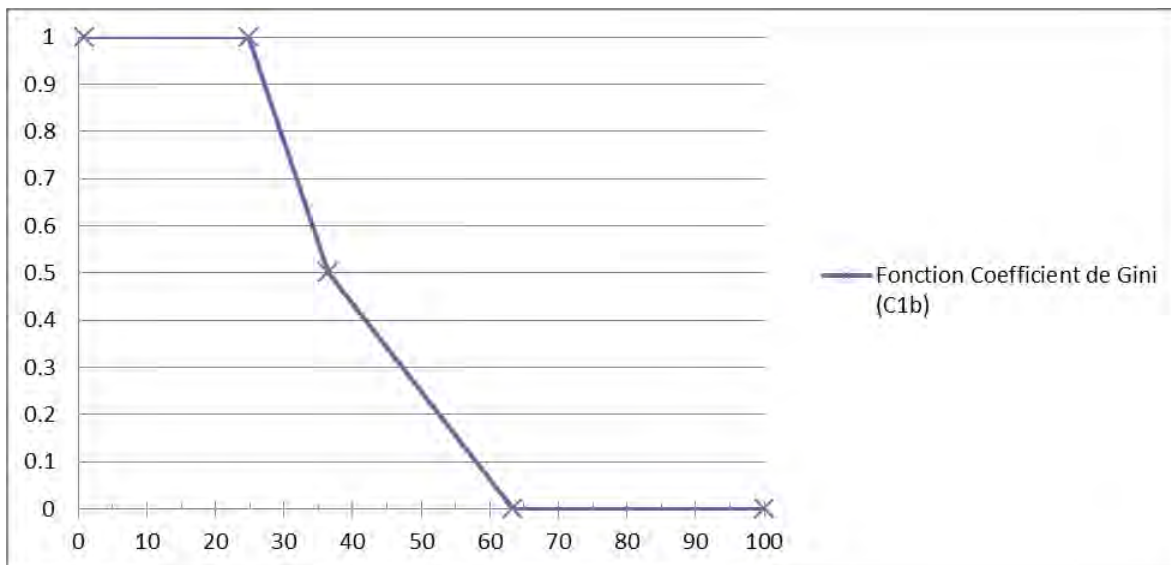
| Indicateur |           | Ensembles d'aptitudes |                  |                |                           |
|------------|-----------|-----------------------|------------------|----------------|---------------------------|
|            |           | Ensemble non-apte     | Aptitude moyenne | Ensembles apte | Source                    |
| C1b        | Gini      | >63.4                 | 36.45            | <24.8          | (Banque Mondiale, 2016)   |
| C2         | Scolarité | 0                     | 6                | 10             | (INEGI, 2010a ; UN, 2011) |

<sup>142</sup> Ceux-ci sont donnés à l'échelle des pays, et sont critiquables à ce titre, mais ils présentent l'avantage d'être utilisables partout dans le monde.

|    |                     |            |     |                     |                           |
|----|---------------------|------------|-----|---------------------|---------------------------|
| C3 | Mortalité infantile | >119       | 37  | <2                  | (Banque Mondiale, 2013)   |
| U1 | Usage public        | < ou = 7.5 | 20  | [50-100]<br>l/hab/j | (Howard et Bartram, 2003) |
|    |                     | > ou = 600 | 300 |                     |                           |

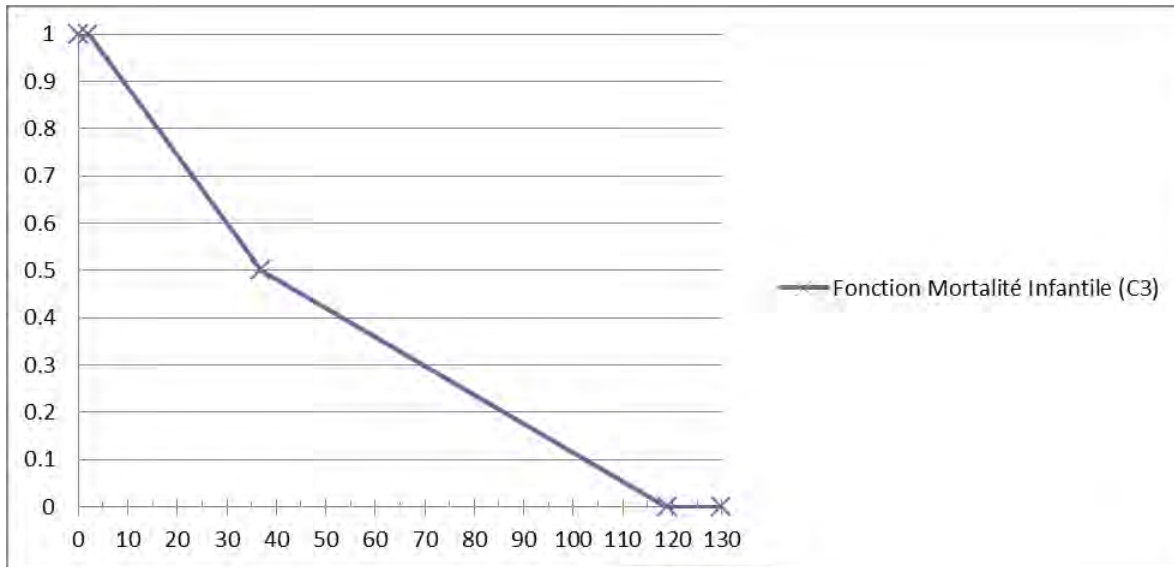
**Tableau 21 : Seuils employés pour les indicateurs conformes aux données internationales**

Le recensement des coefficients de Gini est opéré par la banque mondiale depuis 1980, la base de données correspondante semble intéressante pour construire une courbe d'aptitude qui soit réutilisable de par le monde pour l'indicateur de cohésion sociale (C1b). Néanmoins ce coefficient est traditionnellement élaboré à partir de données relatives au PIB per capita. Or l'indicateur est pour sa part construit à partir de l'ICTPC (ses différences avec le PIB sont détaillées dans la section 2.3.1). Mais, s'agissant de coefficients (de Gini), l'équivalence des deux est présentement assumée en sachant qu'elle peut ne pas être exacte (la pertinence de cette démarche sera discutée en section 3.1.3). Dès lors, cette étude retient que parmi les pays qui ont été étudiés en 2010, la Banque Mondiale (2016) définit une moyenne de 36.45, un maximum de 63.45 et un minimum de 24.8. En l'occurrence, plus le coefficient est faible, plus la cohésion sociale est grande, et donc plus l'aptitude est grande. Dès lors, la normalisation est réalisée grâce à la fonction décroissante illustrée dans le Graphique 2.



**Graphique 3 : Fonction d'appartenance employée pour normaliser l'indicateur de cohésion sociale**

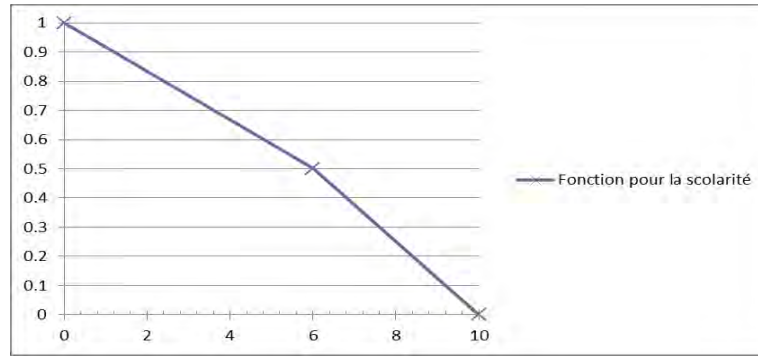
En ce qui concerne l'indicateur de mortalité infantile (C2), l'UNICEF a recensé celle des enfants de moins de un an pour l'année 2011, d'après la Banque Mondiale (2013). La valeur minimale obtenue (dans plusieurs pays<sup>143</sup>) pour l'indicateur est de 2, tandis que la maximale est de 119 à Sierra Leone. La valeur moyenne est quant à elle rapportée à 37 (Banque Mondiale, 2013). La fonction d'appartenance définie de manière décroissante, est alors illustrée dans le Graphique 4.



**Graphique 4 : Fonction d'appartenance employée pour normaliser l'indicateur de mortalité infantile**

La normalisation de deux autres indicateurs (C3 et U1) utilise quant à elle des seuils mondiaux, mais de façon moins directe. Ainsi, pour l'indicateur de scolarité (C3), les MDG et SDG établissent l'objectif d'assurer l'éducation jusqu'à la fin du primaire (UN, 2011 ; United Nations, 2017). Dans les données de l'INEGI, cela correspond au niveau 6. Celui-ci est alors défini comme seuil d'aptitude moyenne. Les aptitudes minimales et maximales sont pour leur part assimilées aux niveaux 0 et au niveau 10, qui correspondent respectivement à une absence de scolarité et à un niveau de baccalauréat.

<sup>143</sup> Il s'agit de la Finlande, l'Islande, le Japon, le Luxembourg, Saint Marin, Singapour, la Slovénie et la Suède.



**Graphique 5 : Fonction d'aptitude employée pour l'indicateur de scolarité**

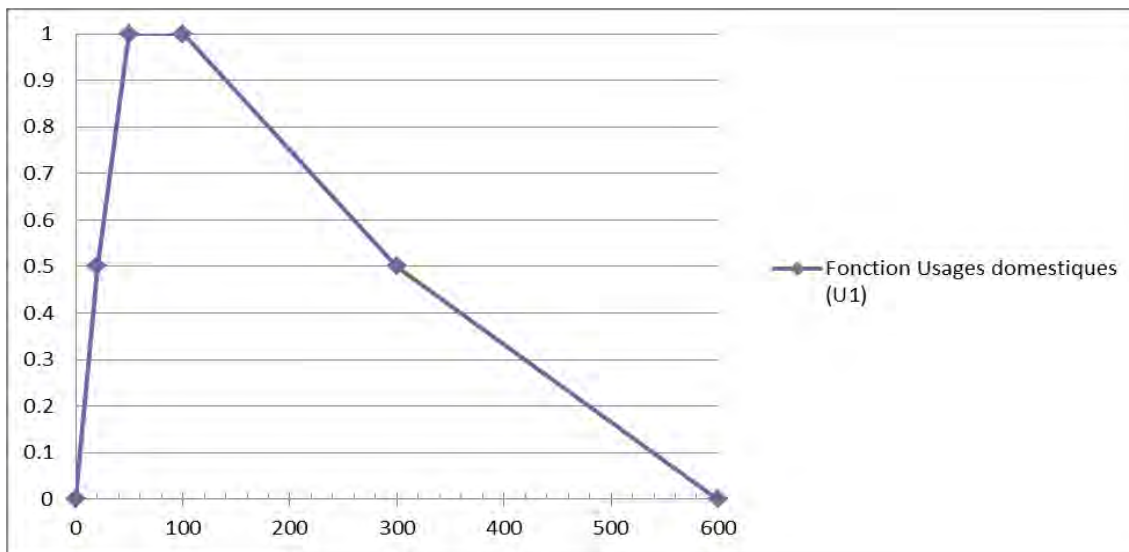
Enfin, l'indicateur d'usage domestique (U1), est fondé sur l'analyse de Howard et Bartram (2003) publiée par l'OMS et traditionnellement employée comme référence à ce sujet (Jemmali et Matoussi, 2012 ; Manandhar et al., 2012). Néanmoins, les seuils traditionnellement extraits de cette étude sont de 20 voire 50 l/hab/j. Mais au Mexique, l'indicateur est caractérisé par des valeurs singulièrement élevées : la consommation d'eau moyenne dépasse les 100 l/hab/j (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2005b, 2010b). Or il se trouve que l'étude de Howard & Bartram (2003) apporte des réponses face à ce constat. Elle définit que :

- ✓ lorsque la source est située à plus de 1000m de l'habitation, les volumes d'eau (inférieurs à 5 l/hab/j) sont insuffisants pour assurer les besoins basiques en eau (à savoir la consommation de la ressource et son utilisation pour la cuisine) ;
- ✓ lorsque la source d'eau est située à une distance comprise entre 100 et 1000m, 20 l/hab/j permettent de couvrir les besoins basiques en eau, mais ils restent insuffisant pour assurer ses usages en termes d'hygiène ;
- ✓ lorsque la source est située sur le terrain ou dans l'habitation, 50 l/hab/j permettent de couvrir outre les besoins basiques, la plupart des besoins sanitaires ;
- ✓ et que lorsque l'eau est distribuée à travers plusieurs arrivées d'eau dans l'habitation, à partir de 100 l/hab/j tous les besoins sont couverts.

Mais Howard et Bartram (2003) signalent qu'outre ces besoins basiques et sanitaires, d'autres usages de l'eau s'ajoutent : il s'agit d'usages productifs qui ne sont pas négligeables pour réduire la précarité des populations concernées. Ainsi définit-il que 300 l/hab/j permettent d'assurer ces usages, et que passé ce dernier seuil, les arguments écologiques prennent le dessus sur les arguments sanitaires et économiques

(Howard et Bartram, 2003). Devant les valeurs particulièrement élevées de l'indicateur et étant données ces considérations, la normalisation est opérée à travers le Graphique 6.

Ainsi, les aptitudes maximales sont-elles confinées entre [50 et 100] l/hab/j, et les aptitudes restent-elles hautes entre [20 et 50] l/hab/j et entre ]100 et 300] l/hab/j, tout en étant décroissantes. Sous 20 l/hab/j, et au-dessus de 300 l/hab/j les aptitudes étant alors considérées comme basses. Et la valeur de 300 l/hab/j a été doublée pour déterminer l'aptitude minimale nécessaire à la construction de la courbe.



**Graphique 6 : Fonction d'aptitude employée l'indicateur d'usage domestique**

- Normalisation des indicateurs plus singuliers

A l'issue de cette seconde série de normalisation, il reste six indicateurs pour lesquels des stratégies spécifiques doivent être développées. Trois d'entre eux sont de nature socio-économique, et présentent le problème du remplacement des valeurs de PIB non disponibles à l'échelle considérée (Sections 2.2.1 et 2.3.1). Les trois autres concernent les diagnostics hydrologiques et environnementaux ; et dans leur cas, même s'ils sont normalisés en fonction du corpus mexicain, ils pourraient être adaptés pour d'autres études.

Pour commencer, faute de disponibilité l'indicateur économique (C1) et les indicateurs d'usages agricoles (U2) et industriels (U3) sont construits en remplaçant le PIB par d'autres données (Section 2.3.1). Cette singularité empêche de les normaliser en employant des références mondiales. Dès lors,

seules les bases de données mexicaines permettent de déterminer les seuils de ces trois indicateurs. La stratégie est alors de définir quelles sont les valeurs maximale et minimale observables au Mexique à l'échelle municipale. Pour cela, les trois indicateurs sont calculés à l'échelle des états, afin de déterminer quels états ont respectivement les plus grandes et les plus faibles valeurs. En leur sein, la même démarche est répétée à l'échelle municipale. A ce stade, il convient d'établir si l'aptitude est proportionnelle aux valeurs, ou si elle a au contraire une évolution inverse. La fonction correspondante restant linéaire, puisqu'il n'y a pas présentement de continuité particulière à respecter, et qu'étant la plus « simple » elle convient le mieux à ce cas de figure (Figure 5, Section 1.4.2).

Pour l'indicateur C1 (CONEVAL, 2010b), le District Fédéral<sup>144</sup> a le plus grand ICTPC (4699\$/hab/mois) ; et en son sein, la municipalité de Benito Juarez détient la valeur maximale (8902 \$/hab/mois). Au contraire, c'est le Chiapas, et en son sein la municipalité de Aldama qui recensent les valeurs les plus faibles (respectivement 1018\$/hab/mois et 426\$/hab/mois). En l'occurrence, plus l'ICTPC est grand plus l'aptitude augmente. La fonction d'appartenance est donc croissante et atteint une aptitude maximale avec 8902 \$/hab/mois, tandis que son aptitude minimale est évaluée à 426\$/hab/mois (Tableau 22).

| Indicateur |                                | Ensembles d'aptitudes    |                  |                           |   |
|------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|---------------------------|---|
|            |                                | Ensemble non-apte        | Aptitude moyenne | Ensembles apte            | Source  |
| M3         | Surexploitation des aquifères  | < -0,5                   | [-0,5 - 0,5]     | > 0,5                     | (Estados Unidos Mexicanos, 2000 ; Omar, 2015) |
| R1         | Quantité d'eau superficielle * | <0mm                     | -                | >750mm                    | (Jiménez et Maderey-R., 1992)                 |
| R3         | Quantité d'eau souterraine *   | <0,5 hm <sup>3</sup> /an | -                | >1973 hm <sup>3</sup> /an | (CONAGUA, 2015c)                              |
| C1         | Capacité économique            | <426\$                   | -                | > 8902\$                  | (CONEVAL, 2010b)                              |
| U2         | Usage agricole                 | 0.17 m <sup>3</sup> /\$  | -                | 5797.7 m <sup>3</sup> /\$ | (CONAGUA, 2010 ; INEGI,                       |

<sup>144</sup> Renommé Ville de México (Ciudad de México) en 2017, il est référencé comme DF dans les bases de données présentement. C'est pourquoi l'ancienne appellation est conservée ici.

|    |                  |                      |   |                           |                                |
|----|------------------|----------------------|---|---------------------------|--------------------------------|
|    |                  |                      |   |                           | 2007)                          |
| U3 | Usage industriel | 0 m <sup>3</sup> /\$ | - | 759.96 m <sup>3</sup> /\$ | (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2009a) |

**Tableau 22 : Seuils employés pour les indicateurs singuliers**

Pour leur part les indicateur d'usage (U2 et U3), exprimés en m<sup>3</sup>/\$/an, représentent la quantité d'eau nécessaire pour créer de la richesse. Ainsi, plus l'indicateur est grand, plus l'aptitude est faible, de sorte que la fonction d'aptitude est définie de manière décroissante. Sur le même principe que précédemment, l'indicateur agricole (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2007), est maximal – et l'aptitude est donc minimale avec 5797.70 m<sup>3</sup>/\$/an – dans la municipalité de Maxcanu située dans l'état du Yucatan. Au contraire l'indicateur est minimal – et l'aptitude est donc maximale avec 0.17 m<sup>3</sup>/\$/an – dans la municipalité de Jalpa de Mendez dans l'état du Tabasco. Et de même, l'indicateur industriel (CONAGUA, 2010 ; INEGI, 2009a), maximal est recensé à Isla Mujeres dans le Quintanaroo (avec 759.96 m<sup>3</sup>/\$/an) tandis que la valeur minimale est recensée à Tlalpan dans le District Fédéral (avec 0.00336 m<sup>3</sup>/\$/an).

Enfin, les trois indicateurs environnementaux qui sont normalisés de manière spécifique, faute de référentiel plus global, sont ceux d'eau superficielle (R1) d'eau souterraine (R3) et d'exploitation des aquifères (M3). En ce qui concerne R3, la normalisation est opérée à travers la même stratégie que pour les indicateurs socio-économiques remplaçant le PIB par d'autres valeurs. Le suivi des aquifères est réalisé par état. Néanmoins, deux états ne recensent qu'un seul aquifère : le Yucatán, et le Campeche. En l'occurrence, le Yucatán présente des caractéristiques géomorphologiques tout à fait singulières (Beddows et al., 2007 ; Cervantes, 2007 ; Gaona-Vizcayno et al., 1980) : celles-ci expliquent la très forte recharge (21 813.40 hm<sup>3</sup>/an) qui y est recensée et qui fait exception à travers le Mexique (CONAGUA, 2015c). Au contraire, la présence d'un seul aquifère au Campeche interpelle car il ne s'agit pas de l'état le plus désertique. Au vu de ces considérations ces deux états sont exclus de l'analyse. Dès lors, c'est le Tabasco (avec 1157.08 hm<sup>3</sup>/an) et la Basse Californie (avec 12.66 hm<sup>3</sup>/an) qui recensent respectivement les plus fortes et plus faibles recharges. En leur sein, c'est La Chontalpa (avec 1973.6 hm<sup>3</sup>/an) qui présente la recharge maximale, et San Lucas (avec 0.5 hm<sup>3</sup>/an) qui présente la minimale. Pour cet indicateur, étant donné que les risques d'inondation ne sont pas inclus dans l'analyse, plus la recharge est grande plus l'aptitude l'est aussi. En conséquence la fonction d'aptitude employée pour la

normalisation se caractérise par un comportement linéaire croissant, entre 0.5 et 1973.6 hm<sup>3</sup>/an (CONAGUA, 2015c).

Pour R1 en revanche le suivi des écoulements superficiels est opéré à l'échelle du Mexique et non séparément dans les différents états. En outre, si la valeur minimale s'impose d'elle-même étant donné qu'elle est égale à 0 mm les plus forts écoulements recensés dans la base de données mexicaine sont très localisées, ce qui réduit leur pertinence comme seuils maximums de disponibilité de l'eau. Etant donné que ces données sont aussi disponibles par région hydrologique, une démarche de normalisation similaire à celle employée pour R3 est utilisée pour R1, mais au lieu de réaliser l'analyse à l'échelle des états, elle est effectuée à l'échelle des régions hydrologiques (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a).

En l'occurrence, en considérant l'étude spécifique relative aux régions hydrologiques, celle qui présente les plus grands écoulements est celle de Grijalva-Usumacinta, laquelle correspond à la région hydrologico-administrative Frontera Sur (CONABIO, 2012), qui couvre la quasi-totalité de l'état du Chiapas. Sur les données employées pour calculer R1, cette région recense un écoulement maximal de 1500 mm. Pour cet indicateur, étant donné que les risques d'inondation ne sont pas inclus dans l'analyse, plus l'écoulement est grand plus l'aptitude l'est aussi. En conséquence la fonction d'aptitude employée pour la normalisation se caractérise par un comportement linéaire croissant, entre 0 et 1500mm.

Et pour M3, l'indicateur a été construit de telle sorte à pouvoir définir plusieurs degrés d'exploitation des aquifères (Section 2.3.3). De fait, l'aptitude croît avec le taux d'exploitation qui sert d'indicateur. La fonction d'appartenance est donc définie de manière croissante. En outre, étant donnée la singularité de l'indicateur c'est la fonction linéaire qui est choisie à défaut d'analyses qui pourrait justifier un autre choix. Avec l'objectif d'évaluer de s'inscrire dans la continuité des analyses mexicaines de surexploitation des ressources souterraines, l'aptitude moyenne est fixée à la valeur 0, en prenant pour seuil maximal 0.5 et pour seuil minimal -0.5. De cette manière, conformément à l'évaluation traditionnelle, les valeurs positives définissent-elles des aptitudes hautes, et les valeurs négatives des aptitudes basses. De plus, cela permet de mettre l'accent sur la préservation environnementale en n'accordant l'aptitude maximale qu'aux cas où la recharge est deux fois supérieure à l'extraction. Au contraire, l'aptitude minimale est déterminée par une extraction dépassant de moitié la recharge, l'effort à fournir pour recharger les aquifères équivalant à ce stade à plus d'une année de suspension totale de



l'exploitation. Les résultats obtenus avec ces seuils sont spécifiquement commentés dans la Section 3.1.3 afin d'alimenter les débats sur ce sujet d'actualité<sup>145</sup>.

Les alternatives adoptées pour normaliser les indicateurs restent discutables, mais c'est une des faiblesses fondamentales de la méthode qui concerne pour le moment toutes les études de l'IPE (Section 1.3.2). Dans ce contexte, en employant une méthode « *FUZZY* » et des seuils les moins locaux possibles, la présente analyse étend au maximum la pertinence et la réutilisation des seuils. De fait, les seuils employés dans cette étude sont majoritairement réutilisables pour le calcul d'IPE régionaux au Mexique, mais aussi dans d'autres régions du monde : ils constituent donc a priori une base pour la discussion de cet aspect méthodologique important. Les résultats obtenus à l'issue de la phase de normalisation sont discutés en les confrontant avec la littérature concernant le territoire (Section 3.1.3), afin de valider la première phase d'élaboration de l'IPE (OECD et JRC, 2008).

#### 2.4.2 *Modéliser l'IPE : comparer différentes unités calculs et différents alternatives d'agrégations*

Afin de favoriser la représentativité territoriale de l'IPE et d'alimenter les discussions portant sur sa corrélation avec l>IDH, des cartes raster sont utilisées, de telle sorte que les unités de calculs correspondent à des pixels (Section 1.4.2). La corrélation entre les échelles et les unités de calcul est donc moins directe que dans la tradition de calcul de l'IPE à l'échelle régionale (Section 1.2.3 et 1.3.1). En l'occurrence, l'objectif est de rendre visible les dynamiques hydrologiques et environnementales dans un calcul de l'IPE à l'échelle municipale.

La présente étude considère aussi un second objectif en ce qui concerne la visibilité des problématiques agricoles et rurales dans les résultats finaux de l'IPE (Section 1.4.1). A ce sujet, les calculs réalisés à l'échelle des pixels présentent certaines alternatives de spatialisation intéressantes. En outre, la proposition d'agrégation de Sullivan et al. (2006), est caractérisée par une compensation totale entre les facteurs de l'IPE, mais Garriga et Foguet (2010b) a démontré l'intérêt de réduire ce phénomène pour augmenter la visibilité des facteurs les plus problématiques (Section 1.3.1). Trois alternatives de calculs

---

<sup>145</sup> Il faut néanmoins signaler qu'il n'est que succinctement abordé dans le cadre de la présente étude et mérite d'être débattu et développé dans des études à venir.

sont donc adoptées, en faisant varier la spatialisation et la compensation, pour modéliser et répondre à ces objectifs analytiques. Cette section explique les stratégies qui sont mises en place et comparées entre elles.

- Echelles et unités de calculs de l’IPE-SIG-municipal : faire le choix des pixels et de la représentativité municipale

L’IPE est construit de telle sorte à obtenir des résultats qui soient pertinents au niveau des municipalités de l’Etat de Chihuahua. Mais les unités de calculs sont adaptées afin de rendre visible les dynamiques hydrologiques et environnementales et de favoriser la répliquabilité de la méthode au Mexique. La démarche consiste concrètement à valoriser plusieurs échelles de calcul.

Les municipalités correspondent à des unités de gestion de premier plan au Mexique, et constituent de fait la plus petite délimitation administrative de gestion territoriale intégrée. A ce titre, elle est d’ailleurs prédominante dans l’Atlas de vulnérabilité de Arreguin Cortés et al. (2015), présenté dans la section 1.4.1. Ces avantages sont nombreux. Tout d’abord, de nombreux suivis y sont réalisés par les autorités publiques de manière relativement systématique (Section 2.2). Le fait que de nombreuses données soient publiées à cette échelle à travers tout le territoire mexicain garantit (jusqu’à un certain point) la répliquabilité de la méthode. En outre, comparée aux autres unités de gestion pour lesquels des données publiques sont disponibles, les municipalités constituent une échelle relativement fine. Cela leur confère un avantage de taille en ce qui concerne l’aide à la prise de décision, puisque des résultats pertinents à cette échelle peuvent servir de plusieurs manières :

- ✓ ils sont directement interprétables dans le cadre des entités municipales qui sont significatives pour la gestion territoriale ;
- ✓ mais ils peuvent aussi servir de base pour des analyses menées à des échelles plus vastes (Fenwick, 2010).

Au vu de ces considérations les municipalités sont adoptées comme échelle de référence pour calculer l’IPE dans l’Etat de Chihuahua : tous les calculs sont donc élaborés pour être pertinents à cette échelle. Les différents résultats obtenus sont commentés ensembles et séparément, mais ils sont aussi utilisés dans la section 3.4 qui complète l’IPE avec les discours d’acteurs concernant la vulnérabilité associée aux pénuries en eau de quatre municipalités agricoles incluent dans la région dite de Delicias.

Néanmoins, pour faire apparaître les variations environnementales, les calculs sont effectués au niveau des pixels. Le découpage de l'échelle municipale est opéré avec une résolution de pixel définie de telle sorte à conserver la richesse des données les plus fines. En l'occurrence, l'échelle la plus fine correspond à 1:250 000 (Section 2.2.2). Et parmi les cartes qui l'emploient c'est la Carte 4 d'USV 2012 qui comprend les plus petites entités qui doivent être détectées pour construire l'IPE, à savoir les surfaces urbaines (CONABIO, 2012). Dans ce contexte, les pixels sont définis de manière à représenter des surfaces de 500m de côté. Cette résolution permet de respecter les continuités hydrologiques et environnementales qui se dessinent dans les bases de données correspondantes.

C'est ainsi que l'IPE-SIG-municipal est construit en valorisant deux types de représentations. Les indicateurs R1, R2, R3, M1, M2, M3 et Q2 sont ainsi représentés de manières géo-localisées : ils représentent les phénomènes sur leur aire d'influence effective. En parallèle, les indicateurs de capacité, d'accès, d'usage mais aussi deux indicateurs de qualité (Q1 et Q3) sont représentés à l'échelle municipale. La spatialisation des indicateurs est opérée sous ArcGis en représentant les données socio-économiques sur chacune des municipalités de l'Etat de Chihuahua délimitées dans la carte des délimitations municipales (Section 2.2). Puis toutes ces cartes (de type vecteur) sont converties en raster, de telle sorte à appliquer les opérations de l'EMC sous TerrSet.

La carte ainsi obtenue permet d'alimenter les discussions portant sur l'interdisciplinarité des résultats de l'IPE, et sur sa corrélation avec l'IDH. Pour ce faire, les résultats de l'IPE-SIG-municipal sont aussi comparés avec ceux de l'IDH-SIG. Cet autre indice est directement obtenu à partir de la carte de la composante de capacité. La comparaison des deux indices prend alors la forme d'une carte soustrayant l'IPE-SIG-municipal à l'IDH-SIG. Enfin, l'IPE-SIG-municipal est aussi discuté en fonction de sa clarté, puisqu'il s'agit d'un aspect crucial des discussions sur les indices (Section 1.1.3 et 1.2.3).

Cette méthode de spatialisation est par définition limitée en ce qui concerne l'approche territoriale relative aux pauvretés en eau socio-économiques. En effet, tous les indicateurs socio-économiques sont représentés à l'échelle municipale, laquelle homogénéise des territoires caractérisés par des pôles de développement urbains, des pôles de développement agricoles, et d'autres espaces plus ou moins connectés à ces pôles (Section 1.1.1). Au vu de ces remarques, l'objectif devient d'adopter une autre

spatialisation, permettant de distinguer les aires urbaines, rurales et agricoles et de réduire ainsi l'homogénéisation qui caractérise l'IPE-SIG-municipal.

- Spatialisations des indicateurs socio-économiques pour le calcul de l'IPE-spatialisé

L'unité de calcul de l'IPE-spatialisé reste le pixel (établi de la même manière que pour l'IPE-SIG-municipal), et les indicateurs environnementaux sont géo-localisés comme précédemment. En revanche, les indicateurs socio-économiques sont spatialisés, lorsque les données le permettent, de sorte à distinguer les territoires urbains et ruraux, agricoles qui jouent un rôle particulier dans la gestion de l'eau (Section 1.1.1). Pour cela, à la manière d'Abraham et al. (2005), une pré-analyse est opérée. Sa finalité est de déterminer des entités spatiales relativement homogènes. Néanmoins, à la différence Abraham et al. (2005) elle ne sert pas à définir des unités de gestion territoriales spécifiques (Section 1.3.1), mais à construire des cartes raster donnant à voir les milieux agricoles et ruraux (Sections 1.4.1 et 1.4.2). Pour cela l'analyse se concentre sur les cartes d'USV 2012, sur celles des délimitations municipales et sur les données socio-économiques concernées. En combinant les bases de données statistiques avec ces cartes, il est possible de représenter spatialement les indicateurs agricoles qui concernent des territoires spécifiques, et de valoriser la richesse des indicateurs démographiques disponibles localement (CONABIO, 2012). La combinaison change néanmoins pour ces deux types d'indicateurs.

La première stratégie concerne les indicateurs d'éducation (C3), et de connexion aux réseaux d'eau domestique (A2) et au réseau d'assainissement (A3), issus des recensements de population de (INEGI, 2010b) opérés localement tous les dix ans. D'après le point précédent, il convient de les transformer pour transcrire la richesse de ces données locales et distinguer des ensembles urbains et ruraux à l'échelle municipale. De fait la définition du monde rural est relativement polémique : les critères de définition font débats (Flores et Glez, 2015). Deux types de critères existent : la concentration de la population et les infrastructures associées<sup>146</sup>. Les données cartographiques et statistiques employées présentement pour définir et cartographier les indicateurs socio-économiques font respectivement écho à ces deux types de définition. En l'occurrence, la carte d'USV de 2012 (INEGI, 2013b) permet de

---

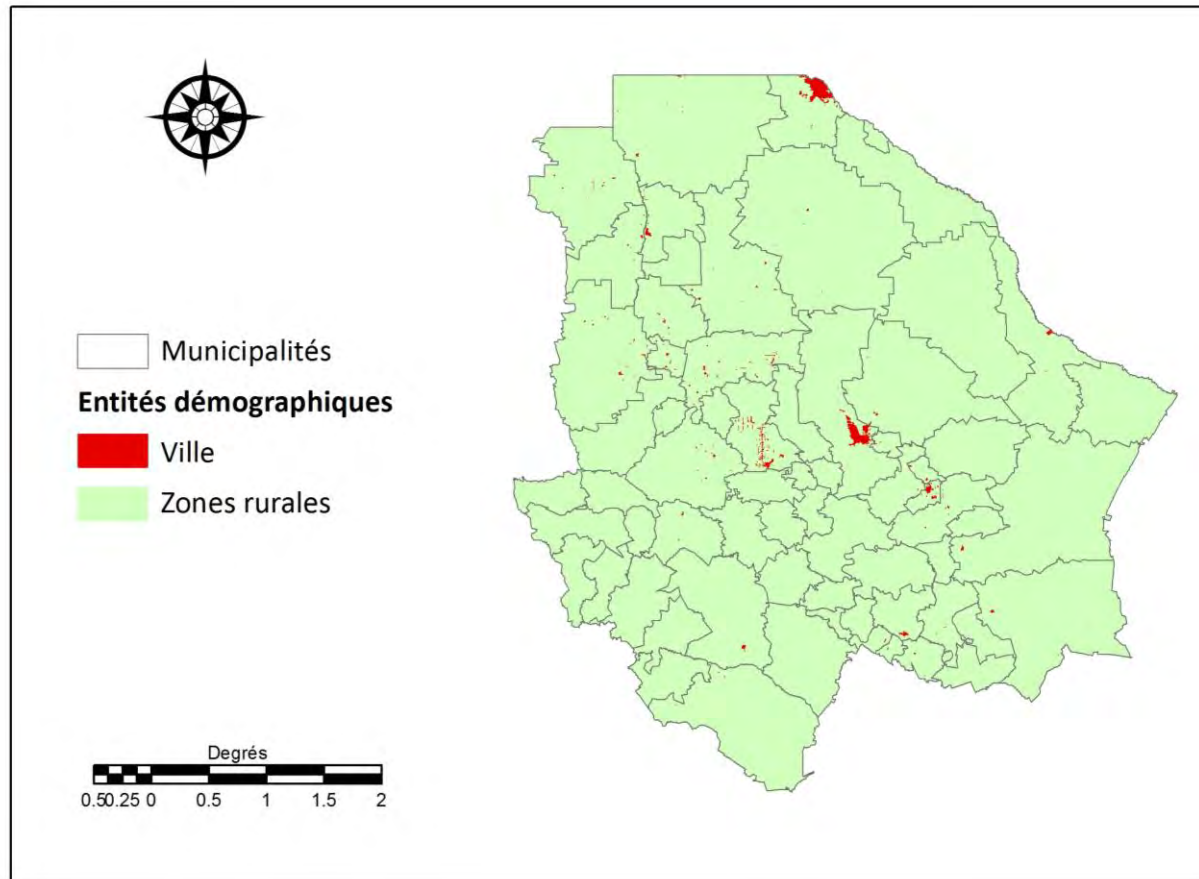
<sup>146</sup> Ces deux critères sont corrélés : plus la concentration démographique augmente plus les infrastructures augmentent. Mais ils présentent chacun leur nuance. Pour plus d'information (Villalvazo et al., 2002).

distinguer deux ensembles territoriaux qui ont des caractéristiques structurelles distinctes : à savoir les territoires dits bâtis et les territoires qui ne le sont pas, soit qu'ils ne le soient vraiment pas, soit que l'extension des constructions ne permette pas de les localiser à l'échelle 1:250 000. En parallèle, l'INEGI (2009b) définit deux ensembles démographiques : les communautés rurales (de moins de 2'499 habitants), les villes (de plus de 2'500 habitants). Au vu de ces remarques, la présente étude fait coïncider dans chaque municipalité les données statistiques concernant les localités de moins de 2 500 habitants avec les espaces non-bâtis, et ceux de plus de 2 500 avec les zones bâties. De fait, ces pôles démographiques sont peu nombreux, et présentent aussi des extensions territoriales notables et des comportements infrastructurels singuliers. Au même titre que les espaces ruraux se distinguent des espaces urbains, ces mégalo-pôles se distinguent des autres villes. En outre, en distinguant ces deux ensembles, une plus grande homogénéité apparaît dans chacune de ces catégories. Aisément repérables sur la carte d'USV par leurs grandes extensions, les mégalo-pôles sont donc employées comme troisième catégorie démographique. Cette stratégie reste certes approximative puisqu'elle ne géoréfère pas les villes ni les localités rurales, et que certains espaces bâtis peuvent en réalité être faiblement peuplés et appartenir au monde rural. Et vice versa : les zones urbaines et zones bâties des communes qui n'avaient pas de données pour les villes sont rapportées aux données rurales. Mais elle permet de définir des unités démographiques plus homogènes que les unités municipales, et d'obtenir une représentation continue.

Pour procéder, les indicateurs (C3 ; A2 et A3) ont été calculés à ces échelles au sein de chaque municipalité, en regroupant les localités en fonction de leur nombre d'habitant :

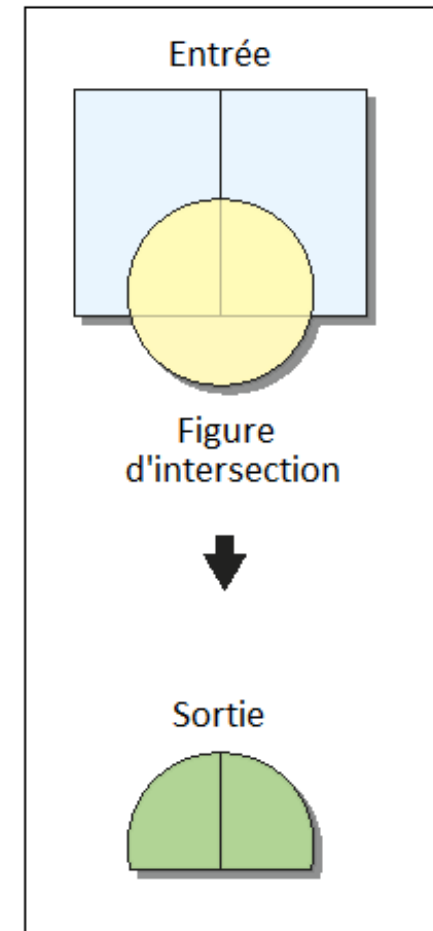
- ✓ Rural : 0- 2 499 habitants ;
- ✓ Ville : plus de 2 500 habitants.

Sous ArcGis, les surfaces bâties ont été extraites à partir de la carte d'USV, puis "intersectées" avec la carte des municipalités (Figure 8). Ces cartes (de type vecteur) sont ensuite converties en raster, de telle sorte à être exploitables sous TerrSet où est opérée l'EMC.



Représentation des ensembles démographiques considérés pour spatialiser l'IFE à Chihuahua, adapté de (CONABIO, 2012)

Figure 8 : Intersection sous ArcGis, adaptée de (ESRI, 2010)

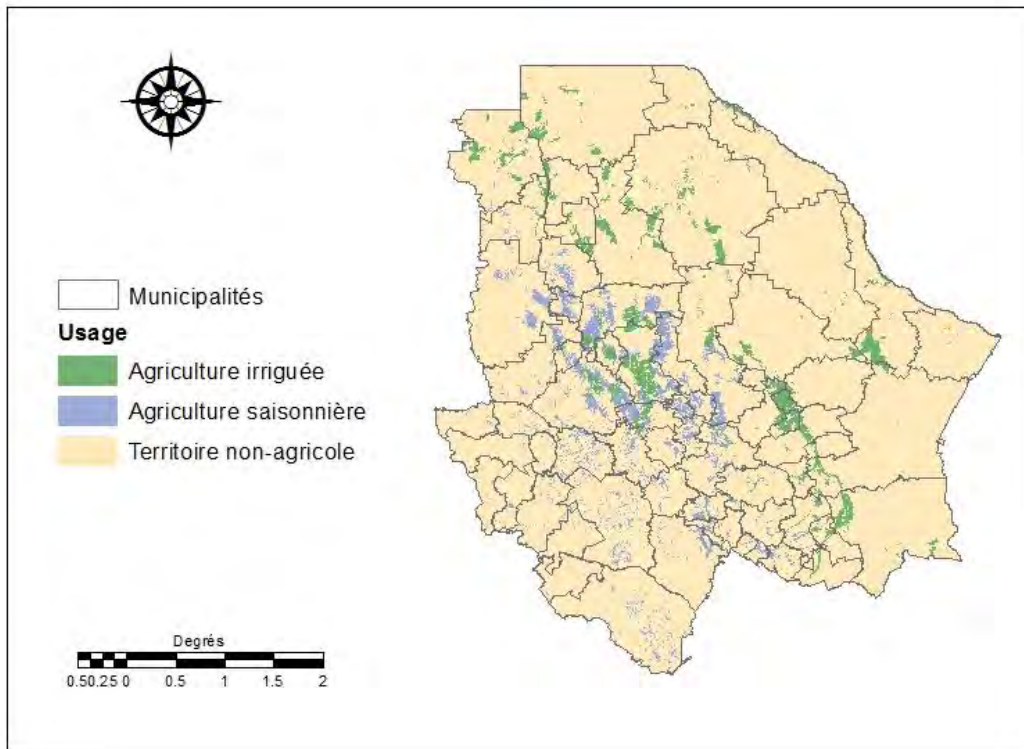


Carte  
9 :

La seconde stratégie concerne quant à elle les indicateurs d'accès à l'irrigation (A1), et d'usage agricole (U2). Ces indicateurs sont disponibles à l'échelle municipale, mais leur aire d'influence est en réalité confinée sur des espaces restreints. Pour rendre visible les problématiques agricoles qui jouent un rôle important dans le cadre de la gestion de l'eau, les indicateurs sont exclusivement concentrés sur les aires correspondantes. Concrètement, la Carte 4 d'USV (Section 2.2.2) distingue les surfaces agricoles (irriguées et non-irriguées). Comme pour les villes, ces surfaces sont extraites puis intersectées avec la carte des municipalités, ce qui permet de les identifier pour chaque municipalité de la zone d'étude. A ce stade il faut noter que la Carte 6 d'USV 2012 (CONABIO, 2012) permet de distinguer les superficies irriguées de celles qui ne le sont pas pour l'ensemble du Mexique et donc pour tout l'Etat de Chihuahua (Carte 10). Dès lors, l'indicateur d'accès (A1) est spatialisé en distinguant ces deux ensembles :

- ✓ il applique aux surfaces irriguées les valeurs propres à chaque municipalité ;
- ✓ mais il attribue aux surfaces non-irriguées la valeur correspondant à cette absence de technologies (à savoir 1).

En revanche, l'indicateur d'usage (U2) attribue à ces deux ensembles les mêmes valeurs puisque l'indicateur est donné à l'échelle municipale et que la carte ne permet en aucun cas d'établir de stratégie spécifique pour les surfaces irriguées non irriguées. U2 confère donc les valeurs de l'indicateur à l'ensemble des surfaces agricoles d'une même municipalité.



**Carte 10 : Représentation des surfaces agricoles considérées pour spatialiser l'IPE à Chihuahua, adapté de CONABIO (2012)**

De telles représentations laissent néanmoins vides les surfaces non-agricoles. Or pour opérer l'EMC sous un format raster aucun pixel de l'aire d'étude ne peut rester vide. Pour obtenir des données continues exploitables sous TerrSet, une valeur neutre est attribuée aux surfaces non-agricoles. Etant donné qu'une analyse « *FUZZY* » est appliquée aux indicateurs en fonctions de leurs degrés d'aptitudes, les surfaces agricoles reçoivent présentement la valeur correspondant à une aptitude moyenne pour chaque indicateur. De cette manière, l'aptitude des surfaces agricoles se distingue positivement (ou négativement) par rapport au reste du territoire dont l'aptitude est moyenne. Les valeurs correspondantes sont respectivement de 3 pour l'indicateur d'accès (A1) ; de 2898.94 pour l'indicateur d'usage (U2). Ces stratégies sont perfectibles, mais elles ont le mérite de se distinguer de l'échelle municipale et à ce titre d'enrichir les discussions en ce qui concerne la représentativité territoriale (Section 3.3.2).

La spatialisation des autres indicateurs socio-économiques ainsi que des deux indicateurs de qualité susmentionnés (C1, C1b, C2, U1, U2, U3, Q1, Q3) reste la même que pour l'IPE-SIG-municipal, à



savoir que les données d'une municipalité sont représentées sur l'ensemble du territoire municipal correspondant sur la carte des délimitations municipales. A l'issus de cette phase l'IPE-localisé est construit avec la même stratégie d'agrégation que l'IPE-SIG-municipal. Mais une troisième alternative de calcul est aussi mise en place afin de réduire la compensation à l'œuvre dans les deux premières alternatives de calcul.

- Alternatives de compensation adoptées dans la phase d'agrégation

Sullivan et al. (2006) agrègent les indicateurs puis les composantes de l'IPE en appliquant des moyennes pondérées, lesquelles attribuent la même pondération à tous les indicateurs d'une composante, ainsi qu'aux cinq composantes (Sullivan et al., 2006). Cette stratégie est adoptée sans aucune modification pour calculer l'IPE-SIG-municipal et l'IPE-spatialisé.

Mais Garriga et Foguet (2010) argumente en faveur de la réduction de la compensation dans le calcul de l'IPE (Section 1.3.1). Cette suggestion reprise dans plusieurs études (Fenwick, 2010 ; Manandhar et al., 2012 ; Van Der Vyver, 2013b), est présentement adaptée en employant la méthode OWA. Celle-ci permet de faire varier le niveau de compensation en fonction de différentes stratégies de prise de risque (Section 1.4.2) :

- 1) Compensation nulle dite pessimiste, seul le facteur le plus problématique est retenu pour procéder à l'agrégation ;
- 2) Compensation dite pessimiste avec un niveau de risque faible, les facteurs les plus problématiques ont alors des poids d'ordre supérieurs à ceux qui sont le moins problématiques ;
- 3) Compensation totale, tous les facteurs sont également considérés dans cette stratégie qui correspond à une moyenne pondérée traditionnelle ;
- 4) Compensation dite optimiste, les facteurs les moins problématiques ont alors des poids d'ordre supérieurs à ceux qui sont le plus problématiques ;
- 5) Compensation nulle dite optimiste, seul le facteur le moins problématique est retenu pour procéder à l'agrégation.

La stratégie de compensation permet d'insister plus ou moins lourdement sur les problématiques de pauvreté en eau. L'objectif de la présente recherche est de discuter la visibilité des diagnostics socio-économiques et hydro-écologiques dans l'IPE dans le cadre spécifique de l'étude des vulnérabilités. Cette démarche spécifique pousse à s'intéresser avant tout aux facteurs problématiques, sans pour autant écarter complètement les facteurs qui le sont moins. C'est pourquoi la stratégie 2 (pessimiste) est appliquée : et comparée à la stratégie 3 qui correspond à la proposition initiale de Sullivan et al. (2006). Pour cela, il convient de choisir des poids d'ordre décroissant en fonction du nombre de facteur considéré. Ceux-ci sont déterminés de manière à obtenir tant que possible des courbes similaires, quels que soient le nombre de facteurs (Tableau 23).

|                               |   | Poids d'ordre |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|---|---------------|------|------|------|------|------|
|                               |   | N°1           | N°2  | N°3  | N°4  | N°5  | N°6  |
| Nombre de facteurs considérés | 2 | 0.7           | 0.3  | -    | -    | -    | -    |
|                               | 3 | 0.6           | 0.3  | 0.1  | -    | -    | -    |
|                               | 4 | 0.5           | 0.3  | 0.15 | 0.05 | -    | -    |
|                               | 5 | 0.45          | 0.25 | 0.15 | 0.1  | 0.05 | -    |
|                               | 6 | 0.4           | 0.25 | 0.15 | 0.1  | 0.07 | 0.03 |

**Tableau 23 : La pondération des poids d'ordre employée pour la stratégie 2 d'agrégation OWA**

En résumé, deux alternatives de spatialisation sont adoptées en ce qui concerne les indicateurs socio-économiques : l'une correspond à l'échelle municipale et l'autre spatialise les données relatives aux ensembles urbains, ruraux et agricoles. Cette seconde option de spatialisation est employée à travers deux formes d'agrégation : l'une avec une compensation totale, et l'autre en adoptant une stratégie de compensation pessimiste. Ainsi, trois cartes d'IPE sont produites et comparées entre elles. Cette modélisation est discutée en fonction de la visibilité qu'elle octroie aux pauvretés en eau des milieux agricoles et ruraux. Afin d'enrichir cette réflexion, les scénarios municipal et spatialisé sont comparées entre elles à travers une carte qui soustraie l'IPE-spatialisé à l'IPE-SIG-municipal.

La méthode décrite jusqu'ici permet d'évaluer l'exposition ainsi que certaines fragilités socio-économiques qui définissent la vulnérabilité aux pénuries en eau dans l'Etat de Chihuahua. Mais pour compléter ce diagnostic par une approche centrée sur la vulnérabilité sociale, la proposition consiste à opérer une analyse de discours dans la sous-région de Delicias. Pour cette région d'étude, le diagnostic

de vulnérabilité associe donc les trois facteurs clés de la vulnérabilité (Section 1.1.2 et 1.4.3) en appliquant la méthode décrite dans la section suivante en plus de l'IPE-SIG.

## **2.5 Analyser les discours d'acteurs : les opportunités des méthodes qualitatives pour préciser l'analyse des vulnérabilités sociales**

Pour rappel, le discours est conçu dans cette étude comme une interface qui permet de comprendre la « dynamique des interactions sociales et donc [d'] éclairer les déterminants des pratiques sociales » (Abric, 1994). En l'occurrence, l'analyse des discours permet de comprendre les pratiques d'acteurs comprises comme la concrétisation de diverses relations au sein d'un socio-écosystème (Section 1.4.3). Afin de compléter l'IPE-SIG, l'analyse a présentement pour objet d'étude les fragilités socio-économiques mais aussi institutionnelles et culturelles, ainsi que les capacités d'adaptation du sociosystème. L'approche adoptée pour cela est de nature qualitative et repose sur la collecte et l'analyse de discours d'acteur. Cette section définit donc les systèmes d'acteurs qui interviennent dans la gestion de l'eau et dans la lutte contre les pénuries en eau de la région d'étude. Puis elle précise les méthodes de collecte et d'analyse adoptées dans le cas présent.

### *2.5.1 Identifier les systèmes d'acteurs de la gestion de l'eau pour échantillonner la collecte de discours à Delicias (Chihuahua)*

Les systèmes d'acteurs se présentent traditionnellement sous la forme de schéma afin d'identifier les différents acteurs et de représenter leurs organisations et interactions (Lemieux, 1991). Les interactions peuvent être de différentes natures : législatives, économiques, socio-culturelles, etc. En outre, elles peuvent être directes ou indirectes, continues ou non, coopératives ou conflictuelles... A ce titre, elles déterminent en partie les relations entre les acteurs d'un même système. L'analyse de discours permet de les interpréter dans ce sens (Section 2.5.2). Mais en attendant, les stratégies de gestion de l'eau et les structures de bases - sur lesquelles se forme le système d'acteur - constituent des éléments

incontournables pour définir l'échantillon de discours. En l'occurrence, la révision bibliographique ainsi que les enquêtes préliminaires ont permis de définir les orientations de la gestion de l'eau dans l'Etat de Chihuahua, et d'établir une première approche des systèmes d'acteurs correspondant. Cela conduit à organiser la collecte autour de trois sous-systèmes de gestion de l'eau, même si les discours collectés au cours des enquêtes en elles-mêmes ont aussi déterminé l'échantillon d'étude.

- Stratégies d'action sur les pénuries en eau dans l'Etat de Chihuahua

Depuis 1992 la *Ley de Aguas Nacionales*<sup>147</sup> (LAN) adoptée par la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*<sup>148</sup> (SEMARNAT), établie que l'eau est administrée au Mexique dans la perspective de favoriser le développement mais aussi en respectant les écosystèmes – qui sont considérés comme vitaux pour l'homme (Estados Unidos Mexicanos, 2011). Ainsi, les autorités publiques promeuvent-elles des actions qui vont dans le sens de la réduction des pénuries en eau. Les stratégies correspondantes sont déterminées en accord avec les SDG présentés dans la Section 1.1.1 (Gobierno del Estado, 2017). Les actions sont donc notamment orientées vers :

- ✓ L'approvisionnement de la population en eau potable, qui passe par le traitement de l'eau et son transport jusqu'au foyer ;
- ✓ La collecte des eaux usées qui vise à préserver la santé des populations ;
- ✓ La prise en compte des cycles de l'eau dans la gestion de cette ressource, ce qui implique de traiter l'eau pour éviter de polluer les écosystèmes par des contaminations biologiques ou chimiques, mais aussi d'adopter des règlements et des structures administratives permettant de conserver les masses d'eau et d'en rationaliser les usages ;
- ✓ « *La incorporación plena de la variable ambiental y la valoración económica y social de las aguas nacionales en las políticas, programas y acciones en materia de gestión de los recursos hídricos, en el ámbito de las instituciones y de la sociedad*<sup>149</sup> » (Estados Unidos Mexicanos, 2011).

---

<sup>147</sup> « Loi des Eaux Nationales »

<sup>148</sup> « Ministère de l'Environnement et des Ressources Naturelles »

<sup>149</sup> « L'incorporation à part entière de la variable environnementale et de la valorisation économique et sociale des eaux nationales dans les politiques, programmes et actions en matière de gestion des ressources en eau, dans les domaines des institutions et de la société. »

La majeure partie de ces actions concerne donc le domaine public, mais la dernière en particulier fait référence au domaine privé. A ce sujet, l'impact des activités agricoles a été signalé dans la Section 1.1.1. Le développement d'une agriculture dite durable (Section 1.1.1) constitue d'ailleurs un domaine d'action de première importance à Chihuahua (Section 2.1.1).

L'association des enjeux économiques et environnementaux en milieu agricole repose sur différentes stratégies dans lesquelles l'irrigation tient une place centrale. Tout d'abord, la construction d'infrastructures de stockage et d'extraction (comme les barrages ou les puits) augmente les volumes d'eau disponibles et servent à ce titre les intérêts économiques associés à l'eau. En supportant l'irrigation, ces infrastructures stimulent l'agriculture et font partie des stratégies de gestion de l'eau adoptées au Mexique, et à Chihuahua notamment (Section 2.1). Il faut signaler que l'opération, la conservation et la valorisation de ces infrastructures se font à travers des systèmes d'acteurs spécifiques, et qu'en plus de leurs objectifs matériels - l'irrigation- impliquent aussi des transformations immatérielles – essentiellement organisationnelles - (Ocampo-Fletes, 2004). En aval, les producteurs peuvent techniciser les infrastructures d'irrigation afin de limiter les pertes par évapotranspiration et infiltration : pour cela la ressource est transportée par des infrastructures spéciales (canaux en ciment, tubes ou tuyaux). Afin de limiter un maximum les pertes, des techniques d'irrigation par aspersion ou par goutte à goutte servent à apporter l'eau jusqu'à la plante. Ces techniques supposent que l'eau circule sous pression, et requiert donc des infrastructures de pompage. Mais les systèmes de drainage sont aussi mis en place pour récupérer l'eau qui n'est pas absorbée par la plante. Et il faut ajouter à cela que la FAO (2012) suggère aussi d'augmenter la valeur ajoutée des productions (notamment en travaillant sur les circuits de distribution ou en réattribuant l'eau vers des plantes à plus grande valeur commerciale ou vers d'autres secteurs d'activité).

Que l'on considère les domaines d'actions publiques ou bien le cas de l'irrigation, deux types de mesures apparaissent : les unes consistent dans le développement d'infrastructures matérielles et vont de pair avec une transformation des pratiques, les autres sont d'ordres immatériels et reposent sur l'adoption des nouvelles pratiques et la transformation des systèmes d'acteurs de la gestion de l'eau. A leur sujet, plusieurs études ont démontré que la configuration et les interactions existantes au sein des systèmes d'acteurs interviennent dans le développement ou la transformation des infrastructures matérielles et l'adoption de nouvelles pratiques (Fontan et Tremblay, 2004 ; Sainz et Becerra, 2003).

Cela explique alors que les actions portant sur les facteurs physiques de pénuries en eau prennent aussi la forme de transformation des systèmes d'acteurs, avec la création d'organismes de gestion spécifiques. Et encore faut-il ajouter que l'intervention d'acteurs extérieurs aux systèmes d'acteurs initial favorise d'ailleurs le développement d'infrastructures et l'adoption de nouvelles pratiques (Albuquerque Llorens, 2008 ; Echeverría, 2008b, 2008a ; Heijs, 2001). Ce dernier point fait partie intégrante des stratégies associées à la gestion de l'eau agricole et plus généralement à la lutte contre les pénuries en eau au Mexique.

- Un système d'acteurs de gestion de l'eau à plusieurs branches

La *Comisión Nacional del Agua*<sup>150</sup> (CONAGUA) coordonne aujourd'hui l'ensemble de ces domaines d'action. Elle est l'organisme délocalisé de la SEMARNAT qui est responsable d'administrer, de réguler, de contrôler et de protéger l'eau au Mexique (Estados Unidos Mexicanos, 2011). Après le ministère, elle est la plus haute autorité en matière de gestion de l'eau et constitue donc un acteur important pour la présente étude. Elle comprend trois niveaux d'administration :

- ✓ Au niveau national la CONAGUA remplit un rôle normatif ;
- ✓ Au niveau des régions hydro-administratives, les *Organismos de Cuencas*<sup>151</sup> ont des missions à la fois normatives et opérationnelles ;
- ✓ Et au niveau *estatal*, les *Direcciones locales*<sup>152</sup> appliquent les stratégies et les stratégies de gestion établis aux deux autres niveaux d'administration de la CONAGUA.

A l'échelle *estatal*, le périmètre d'actions de la CONAGUA est divers. Voilà pourquoi les Directions Locales sont organisées en plusieurs sous-directions qui s'occupent de domaines spécifiques. A Chihuahua, il est apparu que deux sous-directions jouent des importants dans le cadre de la présente étude : la *Sub-Dirección de Infraestructuras Hidroagrícolas*<sup>153</sup> (SIH d'après son sigle espagnol) qui intervient dans la gestion de l'irrigation, et la Sous-direction de l'Eau Potable et de l'Assainissement qui comme son nom l'indique intervient en ce qui concerne l'approvisionnement en eau des populations, et la collecte et du traitement des eaux usées. Ces deux sous-directions constituent le relais à l'échelle

---

<sup>150</sup> « Commission Nationale de l'Eau »

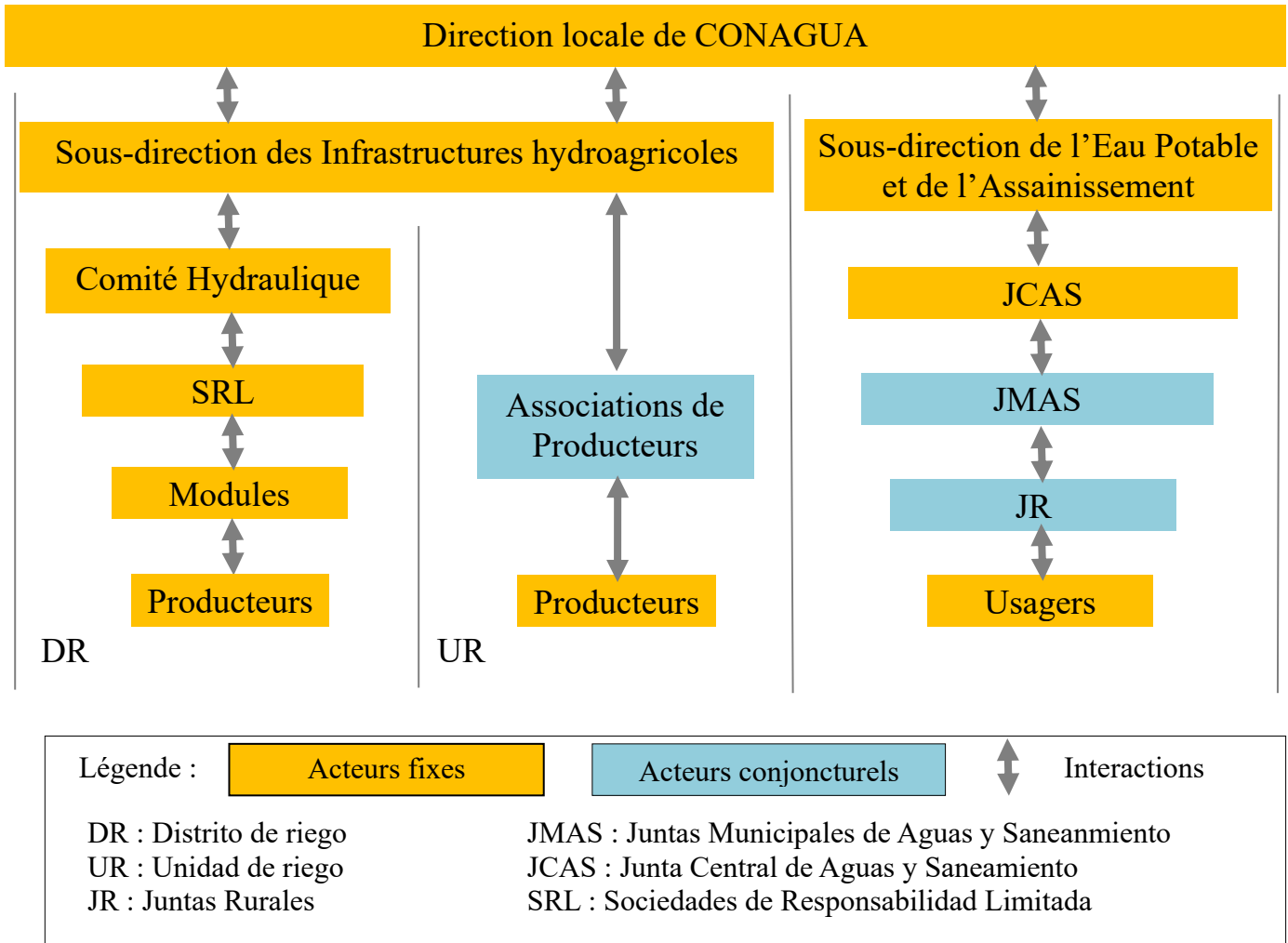
<sup>151</sup> « Organismes de Bassin »

<sup>152</sup> « Directions locales »

<sup>153</sup> « Sous-direction d'Infrastructures Hydro-agricoles »

estatal des décisions adoptées par les *Organismos de Cuenca* et la CONAGUA à l'échelle nationale et sont en relation plus ou moins directe avec les acteurs locaux de la gestion de l'eau (

Figure 9<sup>154</sup>).



**Figure 9 : Système d'acteurs de la gestion de l'eau à Chihuahua**

<sup>154</sup> Comme il a été signalé en introduction, il existe aussi différentes assemblées comme les *Consejos de Cuencas* ou les *COMités Técnicos de Aguas del Subsuelo y Subterráneas* qui réunissent des représentants institutionnels (de la CONAGUA) et des usagers. Le *Plan Estatal de Desarrollo* de Chihuahua signale des manques au niveau de la coordination de ces organismes (Gobierno del Estado, 2017), mais ils ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude qui est exclusivement appliquée à l'échelle locale. C'est pourquoi ils n'ont pas été représentés dans la figure.

La Figure 9, présente six niveaux d'acteurs qui interviennent dans la gestion de l'eau en relation avec les deux sous-directions de CONAGUA. Le nom des acteurs apparaît dans des cadres indiquant l'emboîtement de leurs périmètres d'action respectifs, et les flèches signalent quant à elles leurs interactions. Dans la pratique, ces interactions ne sont pas aussi linéaires que le laisse entendre ce schéma (Section 3.4), mais c'est ainsi qu'elles sont décrites a priori. Quelques acteurs apparaissent dans une couleur spéciale, car ils ne sont pas systématiquement présents. En ce qui concerne l'eau potable par exemple, la *Junta Central de Aguas y Saneamiento*<sup>155</sup> (JCAS) est l'acteur qui coordonne la gestion de toutes les *Juntas Municipales de Aguas y Saneamiento*<sup>156</sup>(JMAS) et de toutes les *Juntas Rurales*<sup>157</sup> de l'Etat (JR). Or il se trouve que :

- ✓ tandis qu'à Rosales il existe une JMAS qui approvisionne en eau le chef-lieu et coordonne souvent les actions des JR qui interviennent dans les différents hameaux de la municipalité (Section 3.4) ;
- ✓ à Julimes, il n'existe pas de JMAS (les JR sont directement en relations avec la JCAS),
- ✓ alors qu'au contraire les usagers de la ville de Delicias sont directement approvisionnés en eau par la JMAS correspondante (dans ce cas, la JMAS remplace la JR).

Autrement dit, tandis que les usagers et la JCAS sont des acteurs fixes, la présence des autres acteurs dépend de la conjoncture locale. De la même façon en ce qui concerne l'irrigation certains acteurs sont fixes tandis que d'autres ne le sont pas, mais le schéma indique cette fois deux types d'acteurs différents.

La *Ley de Aguas Nacionales* établit deux types d'entités pour la gestion de l'eau agricole (Estados Unidos Mexicanos, 2011) : d'une part les DR et d'autre part les UR. Les DR ont à leur tête un Comité Hydraulique, lequel établit des plans annuels d'irrigation sous la supervision de CONAGUA. Dans le DR005, l'eau des barrages est livrée par la CONAGUA à deux SRL<sup>158</sup> (Section 2.1.2), lesquelles

---

<sup>155</sup> « Assemblée Centrale des Eaux et de l'Assainissement »

<sup>156</sup> « Assemblées Municipale des Eaux et de l'Assainissement »

<sup>157</sup> « Assemblées Rurales »

<sup>158</sup> Les « Sociétés de Responsabilités Limitées » ne sont pas spécifiquement relatives aux milieux agricoles, mais dans ce cadre, elles ont en théorie sous leur responsabilité l'opération et l'administration des canaux primaires. Dans les DR elles servent d'intermédiaire entre les producteurs (et les modules) et CONAGUA en les représentant notamment dans les Comités Hydrauliques.



répartissent ensuite l'eau aux Modules<sup>159</sup> qui la distribuent enfin aux producteurs. Les Modules sont dirigés par une assemblée qui élit son bureau de direction (constitué d'un président, d'un adjoint et d'un trésorier). Les SRL regroupent les présidents des différents Modules qui les composent et élisent aussi parmi eux un bureau de direction. Et le Comité hydraulique réunit pour sa part les représentants des deux SRL ainsi que les responsables de CONAGUA qui sont en charge du DR. Dans les UR, la gestion de l'eau revient à une personne morale, constitué par les producteurs eux-mêmes et, constitué le cas échéant comme une assemblée de producteurs usagers de l'irrigation<sup>160</sup>. En l'occurrence, l'approvisionnement en eau ainsi que sa répartition entre les producteurs est définie au moyen de règlements internes à chaque UR. L'organisation prend de fait la même forme que dans les Modules : une assemblée élit son bureau de direction lequel soumet au vote les décisions concernant la gestion de l'eau. Mais contrairement au DR, cette structure n'est pas chapeauté par un Comité hydraulique (la Section 3.4 revient sur les différences DR et UR qui constituent un des axes adoptés pour l'analyse dans la Section 2.5.2).

Les relations existant entre chacun de ces acteurs ainsi que leurs relations avec l'éco-hydrosystème déterminent les vulnérabilités associées aux pénuries en eau (Section 1.4.3). Dans l'actualité, ces relations se concrétisent par la transformation des infrastructures et les pratiques de la gestion de l'eau (Section 1.1.1 et point précédent). Cela apparaît notamment dans le fait qu'outre son rôle dans la délivrance des concessions d'eau et son intervention dans les DR pour la planification de l'irrigation, CONAGUA développe aussi des subventions destinées à moderniser les infrastructures d'irrigation de sorte à limiter les pertes d'eau par évapotranspiration et infiltration (Section 3.4). A ce sujet, certains acteurs extérieurs au système présenté dans la Figure 9 favorisent aussi les transformations par des

---

<sup>159</sup> Ses Associations Civiles d'Usagers définies à partir de la configuration des canaux et des réseaux d'affinités existant entre les usagers constituent des sous unités d'administration qui jouent un rôle essentiel au sein du DR.

<sup>160</sup> Les UR regroupent autant des unités de productions particulières (ranch) que des assemblées de producteurs. Historiquement, au Mexique, des assemblées de producteurs réunissant une partie ou la totalité d'un village étaient constituées en *ejidos*. Ce terme fait référence aux terres et organisations de gestion de l'eau qui étaient jusqu'en 1992 indivisibles et exclusivement employées pour des activités agricoles d'après l'article 27 de la constitution mexicaine (Ocampo-Fletes, 1994). L'article ayant été réformé, les *ejidos* sont aujourd'hui légalement considérés comme des associations de producteurs qui peuvent se diviser à leur gré. Ces associations de producteurs sont importantes à mentionner dans la présente étude, étant donné que les structures correspondantes continuent de jouer un rôle notable dans la gestion de l'eau au sein de la zone d'étude (Section 3.4.1).

interactions spécifiques. En particulier, la *Secretaría de la Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca*<sup>161</sup> (SAGARPA) a notamment pour mission de renforcer les productions agricoles, et collabore donc en ce sens avec la CONAGUA et avec les producteurs (au moyen de subventions et de soutiens logistiques détaillés dans la section 3.4). A la SAGARPA viennent s'ajouter d'autres acteurs (universités, agronomes, etc.) que la littérature spécialisée appelle des « supports de l'innovation » car ils entretiennent des relations avec les systèmes d'acteurs productifs qui favorisent elles aussi l'adoption de nouvelles pratiques (Heijs, 2001). De fait plusieurs supports - non pas de l'innovation mais de l'adaptation et de la lutte contre la vulnérabilité sociale - interviennent dans la région d'étude (ils sont présentés dans la Section 3.4) : étant donné leurs impacts sur la gestion de l'eau, et par extension sur les pénuries et les vulnérabilités liées à l'eau, les discours de ces acteurs sont intégrés dans l'analyse au même titre que ceux collectés au sein du système d'acteurs.

- Stratégie d'échantillonnage des discours

Les acteurs qui viennent d'être présentés sont en relations les uns avec les autres et ont en outre une relation privilégiée avec l'éco-hydrosystème dans le cadre de la gestion de l'eau et de la lutte contre les pénuries en eau. Leurs discours délimitent des périmètres d'action et des modes de fonctionnement au sein desquels ils se positionnent eux-mêmes, et positionnent aussi d'autres acteurs (Sections 1.4.3 et 2.5.2). L'analyse de ces discours permet ainsi d'obtenir des renseignements sur les relations propres à l'individu mais aussi, plus généralement, sur celles qui lient les composantes humaines et environnementales du socio-écosystème. Par conséquent, les discours exprimés individuellement nourrissent l'analyse portant sur l'ensemble du système. Dès lors, il est possible d'échantillonner les discours au sein d'un système d'acteur pour observer les relations existant dans un socio-écosystème.

Pour cela, il convient de rappeler que l'objectif est de déterminer la vulnérabilité sociale et les capacités d'adaptation du sociosystème face aux pénuries en eau. Dans ce cadre, l'intérêt porte sur les relations inscrites au sein des trois branches du système d'acteur de gestion de l'eau établi dans le point précédent, ainsi que sur celles qui déterminent la lutte contre les pénuries. L'échantillonnage est donc conçu en considération de trois axes relatifs à :

---

<sup>161</sup> « Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage, du Développement durable et de la Pêche »

- ✓ l'eau domestique (Section 2.2) et l'assainissement ;
- ✓ l'irrigation ;
- ✓ la réduction des pénuries en eau.

En ce qui concerne l'eau domestique et l'assainissement, l'organisation du système d'acteur semble relativement linéaire, elle est en outre relativement fermée, impliquant avant tout des organismes publics<sup>162</sup>. En revanche, en ce qui concerne l'eau d'irrigation, deux structures coexistent et les intérêts privés jouent un rôle clé à travers la figure des producteurs. A ce sujet, au cours des enquêtes préliminaires (mais aussi tout au long de l'étape de collecte dans la région d'étude) il est apparu que même si les structures de gestion des DR et des UR sont distinctes (et vont de pair avec différentes vulnérabilités sociales), elles impliquent les mêmes producteurs (Section 3.4). De plus, la présentation du système d'acteur réalisée précédemment en se concentrant sur les acteurs de la prise de décision ne fait pas mention de certains acteurs dont l'importance a été soulignée par toutes les enquêtes réalisées relativement à l'agriculture irriguée, à savoir les techniciens et les opérateurs de l'irrigation. Ils sont donc inclus dans l'analyse au même titre que les autorités de la gestion de l'eau d'irrigation, puisqu'ils collaborent avec elles en appliquant leurs prises de décisions. Enfin, pour étudier les capacités d'adaptations du sociosystème, une attention particulière est aussi portée aux discours de deux profils d'acteurs :

- ✓ les supports de l'adaptation face aux pénuries en eau, qui sont définis comme des acteurs extérieurs au système d'acteurs de la gestion de l'eau à proprement parlé entrent ponctuellement en relation avec ce système et influencent ses capacités d'adaptation et sa vulnérabilité sociale ;
- ✓ les producteurs, qui font montre de stratégies de réduction des pénuries en eau, en l'occurrence ceux qui emploient des systèmes d'irrigation technicisés qui réduisent a priori les pénuries physiques mais aussi économiques.

Comme l'indique le Tableau 24, quatre catégories d'acteurs sont définies : les producteurs (P), les autorités et les opérateurs de l'irrigation (I), les acteurs concernés par la gestion des eaux domestiques tant en termes d'approvisionnement qu'en termes d'assainissement et de traitement (J), et les supports de l'adaptation face aux pénuries en eau (S). Deux sous-catégories distinguent aussi les producteurs sans

---

<sup>162</sup> Conformément à la tradition de recherche correspondante (1.1), les acteurs associés à la commercialisation des eaux en bouteille n'entrent pas dans l'étude des pénuries en eau ou des vulnérabilités sociales qui leur sont associées.

technification, et ceux avec technification de leurs parcelles. Et de la même façon les autorités et les opérateurs de l'irrigation définissent deux sous-catégories aussi. De cette manière 70 entretiens ont été menés au total, dont 31 auprès de producteurs et 39 auprès d'institutions et de représentants qui sont les agents vulnérables du système (en plus de l'environnement et des usagers de l'eau domestique dont le cas est commenté ci-dessous).

A ce stade il faut signaler que parmi les acteurs dont les discours ont été collectés, 16 sont considérés comme des acteurs « multi-casquette » car ils appartiennent à plus d'une catégorie d'acteurs. C'est surtout le cas des producteurs, parmi lesquels une personne (P56) appartient à trois catégories d'acteurs tandis que les autres entrent dans une seule autre catégorie (souvent autorités de la gestion de l'irrigation). En tenant compte de cela et en accord avec la littérature spécialisée, l'objectif a été fixé d'éviter autant que possible qu'une même catégorie (ou sous-catégorie) d'acteurs soit surreprésentée ou sous-représentée (Sébastien, 2006).

| Catégories d'acteurs                                  |   | Code des acteurs   | Nombre d'acteurs | Acteurs multi-casquette |
|---|---|--|------------------|-------------------------|
| Producteurs   | Sans technification                       | P4 ; P6 ; P9 ; P11 ; P12 ; P13 ; P25 ; P26 ; P27 ; P33 ; P34 ; P42 ; P44 ; P45 ; P54 ; P55 ; P56 ; P63 ; P66 | 19               | 8                       |
|   | Avec technification                       | P18 ; P23 ; P35 ; P37 ; P38 ; P39 ; P40 ; P43 ; P46 ; P50 ; P64 ; P65  | 12               | 6                       |
| Autorités et opérateurs de la gestion de l'irrigation | Autorités (institutions et représentants) | I2 ; P6 ; I30 ; P31 ; P38 ; P39 ; P40 ; P45 ; P50 ; P56 ; I59 ; I69  | 12               | 8                       |
|   | Opérateurs                                | I5 ; I28 ; I29 ; I32 ; I41 ; I47 ; I48 ; I49 ; I61 ; I62   | 10               | 0                       |
| Acteurs concernés par la gestion des eaux domestiques |   | J1 ; J3 ; P4 ; J7 ; S8 ; J16 ; J21 ; J36 ; J51 ; J52 ; J53 ; P55 ; P56 ; J58 ; I69 ; J70                     | 16               | 5                       |
| Supports de l'adaptation face aux pénuries en eau     |   | S8 ; P9 ; S10 ; S14 ; S15 ; S17 ; P18 ; S19 ; S20 ; S22 ; P23 ; S24 ; P25 ; P44 ; S57 ; S67 ; S68            | 17               | 6                       |

**Tableau 24 : Échantillonnage des discours**

Avec les postulats mentionnés, les profils d'acteurs interrogés ont été le plus varié possible afin qu'ils reflètent la diversité du socio système. En particulier des discours ont été collectés pour tous les types

acteurs du système d'acteurs présenté dans le point précédent<sup>163</sup>. En ce qui concerne les eaux domestiques, il est notable que des techniciens ont été inclus dans l'échantillon, car comme pour l'eau d'irrigation ils jouent un rôle important dans la gestion. En outre, quelques discours d'usagers ont été récoltés mais les informations recueillies dans ce cadre ont été rares : les interlocuteurs ont préféré laisser la parole aux organismes responsables comme s'ils n'étaient pas impliqués dans ce sujet qui semblait les dépasser. C'est pourquoi après quatre tentatives, les usagers en tant que tel ont été exclus de l'échantillonnage des discours et deux organismes de *Desarrollo Integral de la Familia* (DIF) ont été inclus puisqu'ils mènent quelques actions de communication portant sur la culture de l'eau (incluant des recommandations sanitaires). En ce qui concerne les acteurs en relation avec l'eau d'irrigation, il faut ajouter que parmi les autorités et les supports de l'adaptation 29 acteurs interagissent avec les DR et 18 avec les UR (certains acteurs interagissant avec ces deux entités indistinctement).

Enfin, en ce qui concerne spécifiquement les supports de l'adaptation, l'échantillon s'est dessiné au fur et à mesure des entretiens avec les membres des systèmes d'acteurs de la gestion de l'eau : lorsqu'un support était mentionné par un acteur, il était contacté afin de collecter son propre discours. La diversité des acteurs inclus dans cette catégorie est donc notable. La SAGARPA est incluse dans cette catégorie<sup>164</sup>, ainsi que les organismes qu'elle finance et promeut comme *Sanidad Vegetal*<sup>165</sup>, l'*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*<sup>166</sup> (INIFAP), les *Comités de Desarrollo Rural*<sup>167</sup>, les *Systema Producto*<sup>168</sup> de noix et de cacahuète. Outre ces acteurs, ont aussi été mentionnés et interviewés : des ingénieurs et des universitaires de l'*Universidad Autónoma de Chihuahua*<sup>169</sup> (UACH), le gouvernement municipal de Julimes, le WWF, l'ONG Conchos et quelques particuliers (ingénieurs, voisins ou connaissances) aidant des producteurs dans des démarches d'ordre administratives.

---

<sup>163</sup> Seule a manqué la sous-direction d'eau potable et d'assainissement, dont le discours a néanmoins été relayé par la JCAS.

<sup>164</sup> Il faut signaler que Heijs (2001) a qui est emprunté le terme « support » inclut les autorités publiques dans une catégorie d'acteurs à part. Mais dans la présente étude il ne paraissait pas pertinent d'isoler ces acteurs puisque certaines d'entre elles interviennent directement dans la gestion de l'eau, tandis que d'autres s'ajoutent au système initial.

<sup>165</sup> « Hygiène végétale »

<sup>166</sup> « Institut National de Recherches Forestière et Agricoles et de l'Élevage »

<sup>167</sup> « Comité de développement Rural »

<sup>168</sup> « Système produit »

<sup>169</sup> « Université Autonome de Chihuahua »

### 2.5.2 *Collecter les discours et identifier les relations qui déterminent les vulnérabilités associées aux pénuries en eau dans la région agricole de Delicias*

« Le but est ici de produire des connaissances capables d'éclairer les pratiques des acteurs, non pas en formulant des lois générales, des recettes, mais en [permettant de les situer] dans leur champ d'action et de mieux mesurer les contraintes et les interactions du jeu d'acteurs. Il est donc essentiel de prendre comme point de départ le vécu des acteurs » (Sébastien, 2006). Pour cela, il convient de collecter les discours. La méthode préférentiellement adoptée est celle des entretiens compréhensifs dont l'avantage réside dans le respect des lignes de pensées inhérentes aux discours des acteurs qui étaient majoritairement amenés à parler de sujets relativement familiers (Kauffmann, 2011). Cette section explique comme les acteurs ont donc été encouragés à parler de la gestion de l'eau et des vulnérabilités associées aux pénuries en eau. Puis, elle expose la méthode d'analyse de discours adoptée pour déterminer les relations et les interpréter en rapport avec les vulnérabilités sociales et les capacités d'adaptation du sociosystème.

- Conduite adoptée pour collecter les discours employés pour analyser les relations qui déterminent la vulnérabilité sociale et les capacités d'adaptation liée aux pénuries en eau dans la sous-région de Delicias

« Au cours des entretiens, il s'agit [...] de faire surgir un maximum d'éléments d'information et de réflexion qui serviront de matériaux à une analyse de contenu systématique qui répond quant à elle aux exigences d'explication, de stabilité et d'intersubjectivité des procédures » (Van Campenhoudt et Quivy, 2011). Pour cela plusieurs techniques d'entretien existent, et laissent plus ou moins de liberté aux personnes enquêtées. En l'occurrence, les entretiens directifs impliquent de répondre à des séries de questions préétablies, tandis que les entretiens semi-directifs sont préparés en définissant les thématiques de l'entretien et en préparant ce qui est appelé des relances pour passer d'une thématique à l'autre. L'entretien compréhensif est pour sa part encore plus libre que l'entretien semi-directif puisque

l'enquêteur joue alors un rôle de facilitateur et de stimulateur du discours (Berthier, 2006). Ces trois types d'entretiens supposent donc différents positionnements de l'enquêteur et de l'enquêté.

De fait, l'entretien s'élabore comme une négociation entre l'enquêteur et l'enquêté qui déterminent les objets du discours (Van Campenhoudt et Quivy, 2011). Dans le cas présent, l'objectif est de collecter les discours associés aux pénuries à l'eau et reflétant le positionnement de la personne enquêtée et les relations qu'elle entretient et identifie au sein du socioécosystème dans le cadre de la gestion de l'eau. Cet objet d'étude est au cœur même des négociations territoriales qui déterminent la gestion de l'eau, et constitue donc (jusqu'à un certain point) un sujet familier pour les acteurs considérés (Section 2.5.1). Une possibilité s'offre alors à l'enquêteur : celle de se présenter comme un porte-parole du système d'acteurs. De fait la collecte des discours donne lieu à une analyse qui se traduit dans une synthèse écrite. L'enquêteur joue à n'en pas douter un rôle d'intermédiaire entre les acteurs du territoire et la communauté scientifique ainsi que les autres organismes avec lesquelles cette dernière est amenée à travailler dans le cadre de l'aide à la prise de décision (Section 1.1). Il convient de préciser que ce porte-parole n'est pas docile ou crédule, comme le savent déjà les personnes enquêtées les entretiens sont multipliés et soumis à une analyse afin de garantir cela. Au contraire, il ne convient pas non plus de se présenter comme un porte-parole influant. Le fait est que l'enquêteur est plutôt un porte-parole extérieur, et un traducteur de l'oral à l'écrit (avec les exigences que cela suppose). En se présentant de la sorte, l'enquêteur est amené à préciser avec qui il travaille, et le sens de son étude. Le positionnement de l'enquêteur par une présentation vulgarisée du contexte et de l'objet d'étude permet ainsi d'ouvrir l'entretien en l'orientant vers l'objet d'étude tout en laissant une vraie marge de manœuvre à l'enquêté. De là, l'entretien prend la forme d'une discussion dans laquelle l'enquêteur joue le rôle de facilitateur du discours de l'enquêté en le faisant clarifier et préciser certains propos qui l'intéressent particulièrement.

Pour mener à bien ce rôle, des thématiques d'intérêt sont prédéfinies pour inciter les acteurs à en parler. Ces thématiques sont identifiées à partir d'hypothèses portant sur les relations qui déterminent la vulnérabilité et les capacités d'adaptation du sociosystème face aux pénuries en eau. Dans ce but, un guide d'entretien similaire à ceux employés pour les entretiens semi-directifs définit les thématiques d'intérêt et leur associe quelques mots clés utilisables au cours de l'entretien (Tableau 25). Il a été défini à la suite d'entretiens exploratoires, lesquels permettent de préciser les hypothèses d'étude et de trouver les mots clés qui peuvent servir d'interface entre les objets d'étude et le discours des personnes

enquêtées. A l'issue des entretiens exploratoires et en accord avec le cadre théorique de cette étude, les hypothèses portant sur les relations qui déterminent la vulnérabilité sociale et les stratégies d'adaptation face aux pénuries en eau dans la sous-région de Delicias ont été définies comme suit :

- ✓ Les représentations et les pratiques incluent l'aridité comme une menace, mais confèrent une faible visibilité aux problèmes de qualité de l'eau (fragilités culturelles face aux facteurs physiques de pénuries en eau) ;
- ✓ La régulation sociale hiérarchise les pénuries en eau agricoles, favorisant la structure des DR et défavorisant celles des UR qui entretiennent différentes relations avec les institutions (fragilités socio-économiques et institutionnelles) ;
- ✓ L'adaptation se fait à travers des processus de régulation sociale spécifiques, au sein desquels les institutions jouent un rôle qui détermine fondamentalement les vulnérabilités concernant notamment les problèmes environnementaux et les problèmes sanitaires qui affectent les milieux ruraux (capacités d'adaptation).

Pour tester ces hypothèses auprès des différents types d'acteurs interviewés, les entretiens ont été menés en considérant les thématiques et les formules reprises dans le tableau suivant.

| Thématiques   | Acteurs de la gestion de l'eau  | Supports de l'adaptation  | Usagers de l'eau domestique (2.5.1)                             |
|---|---|---|---|
| Fragilités culturelles face aux facteurs physiques de pénuries en eau | Approvisionnement ou Irrigation ; <b>Défis</b> ; Problèmes de quantité ou de qualité ; Barrages ; Stations d'épuration ; Puits ; Rivière ; Sècheresse | <b>Défis</b> ; Problèmes de quantité ou de qualité ; Irrigation ; Barrages ; Eaux noires ; Puits ; Sècheresse | Eau ; Qualité ; Hygiène ; Cuisine ; Sècheresse                  |
| Fragilités socio-économiques et institutionnelles                     | Gestion ; Répartition ; Accords ; Aide ; <b>Contacts</b> ; Conseil ; SAGARAPA ou <i>Juntas...</i> ; CONAGUA   | Participation ; Prix ; Matériel ; <b>Contacts</b> ; SAGARPA ou <i>Juntas...</i> ; CONAGUA                     | <i>Juntas...</i> ; Comités ; CONAGUA ; Responsabilité ; Recours |
| Capacités d'adaptation  | <b>Projets</b> ; Changements ; Assainissement ; Santé   | Technification ; Puits ;  | Connexions ; Santé ; Bouteilles ; Station d'épuration           |

**Tableau 25: Lignes directrices et termes employés pour la tenue des entretiens compréhensifs**

Il faut remarquer que lors de la phase exploratoire, toutes les tentatives d'approches concernant les problématiques de contamination de l'eau par l'arsenic ont été vaines. Toutes ont conduit à couper les enregistrements pour donner lieu à des discours évasifs et en rupture avec le ton du reste des entretiens. Cette thématique n'a donc pas été incluse directement dans le guide, même si elle a été abordée de



manière détournée au cours des entretiens, en rebondissant sur les problèmes de qualité de l'eau et d'insécurité lorsqu'ils étaient abordés par l'enquêté. Les résultats obtenus ont été minimes là aussi (ce silence est discuté dans la Partie 3, tant dans le cadre de l'IPE-SIG que dans celui de l'analyse qualitative des discours).

Préférentiellement les rencontres avec les acteurs ont été enregistrées. Néanmoins huit acteurs (J1 ; J2 ; J7 ; P9 ; S14 ; P56 ; S60) ont témoigné une préférence pour ne pas être enregistrés, ou bien pour éteindre l'enregistreur à certains moments des entretiens (pour diverses raisons) : cela n'a pas conduit à exclure leurs discours de l'analyse. Dans ces cas les entretiens ont donné lieu à une prise de note incluant quelques citations copiées sur le vif, et les lignes de pensées récoltées au cours de la discussion. La prise de note restant parcellaire par rapport au discours original, la transcription de ces discours à l'écrit a été intégralement faite au style indirect. Et il faut ajouter le cas d'un acteur (S14) qui ne souhaitant pas être enregistré a néanmoins laissé à l'enquêteur un texte en complément de l'entretien. Cela rejoint le second type d'exception, relatifs aux acteurs qu'il n'a pas été possible d'interviewer mais dont les discours étaient accessibles par d'autres moyens.

De fait, il est aussi possible de collecter des discours et d'observer des pratiques à travers l'observation participante (Soulé, 2007). Dans ce cas, les discours peuvent être oraux ou écrits, et n'impliquent pas directement ou strictement l'enquêteur : celui-ci n'est qu'un remplaçant fortuit des autres membres du sociosystème. Contrairement aux discours d'entretiens, ils donnent à voir la gestion territoriale en action : qu'ils soient oraux et/ou écrits, officiels et/ou officieux, les mots des acteurs impliqués sur le territoire interviennent activement dans chaque étape de sa gestion. Ces discours qui n'impliquent pas l'enquêteur en tant que tel sont donc intéressants pour l'analyse de la vulnérabilité sociale et des capacités d'adaptation du sociosystème. Le discours de la direction locale de CONAGUA a notamment été collecté à travers l'observation participante. Deux évènements ont notamment permis d'aborder ce discours : l'expo-agro et le Forum de l'eau qui se sont conjointement tenus à Chihuahua les 23-24-25 septembre 2016, ainsi qu'une journée d'étude portant sur la durabilité des aquifères organisée par l'*Instituto Nacional de Ecología*<sup>170</sup> (INECOL) en mai 2016 au *Centro de Investigación en Materiales Avanzados*<sup>171</sup> (CIMAV) de Chihuahua. En outre, il est notable que la SAGARPA publie et distribue de

---

<sup>170</sup> « Institut National d'Ecologie »

<sup>171</sup> « Centre de Recherche en Matériaux Avancés »

nombreux documents aux producteurs : certains d'entre eux ont donc été inclus pour compléter le discours de cette institution qui joue un rôle notable dans la problématique d'étude. Il faut aussi ajouter à cela qu'un travail d'observation participante a été mené aussi dans divers évènements :

- ✓ des réunions mensuelles organisées par les comités de développement durable de Julimes et Rosales,
- ✓ des évènements organisés par les *Sistema Productivo Nogal* et *Sistema Productivo Cacahuate* ;
- ✓ la remise du « *Plan director para la rehabilitacion modernizacion, tecnificacion y equipamiento de las 'unidades de riego de los municipios de Rosales, Meoqui, Julimes, Estado de Chihuahua Sociedad de Responsabilidad limitada de interés publico de capital variable* »;
- ✓ un évènement relatif à l'agriculture biologique organisé dans le Module 7 ;
- ✓ une remise de tracteurs de la SAGARPA aux producteurs faisant partie de la *Unión Nacional de Trabajadores*<sup>172</sup> (UNTA).

Cette collecte constitue finalement un corpus hétérogène (taille des entretiens, et forme des discours enregistrés, écrits, oraux...) et riche. Celui-ci a été analysé dans le but de produire une synthèse relative à la vulnérabilité sociale et aux capacités d'adaptation du système d'acteurs complétant les cartes d'IPE-SIG pour diagnostiquer les vulnérabilités associées aux pénuries en eau. Les sections suivantes détaillent la méthode d'analyse des discours employée à cette fin.

- Analyser qualitativement le contenu des discours

Il existe plusieurs techniques d'analyse de contenu qui permettent d'étudier divers objets d'étude en sciences humaines et sociales. Certaines portent sur tous les mots (à travers des comptages de mots par exemple), d'autres sur un type de mot spécifique (le verbe, le nom...), d'autres sur les modalités d'expression (l'emploi des pronoms...), d'autres encore sur les thèmes abordés dans le discours, etc. Néanmoins, « entreprendre de faire de l'analyse de discours [avec ces dispositifs artificiels de lecture revient à] présupposer un manque (une défaillance, carence, ou paralysie) affectant la pratique « naturelle » de la lecture et de l'écoute » (Pecheux, 1981). C'est pourquoi dans le cas présent c'est bien la pratique naturelle de l'écoute qui a été adoptée pour réaliser l'analyse. L'écoute a supporté les trois phases de l'analyse : la préparation des entretiens, leur organisation, et la mise en forme de l'analyse.

---

<sup>172</sup> « Union Nationales des Travailleurs »

En ce qui concerne la première phase de préparation des entretiens, la pratique la plus courante est celle de la retranscription intégrale (Van Campenhoudt et Quivy, 2011), mais il faut dire qu'elle comprend aussi des limites. Outre le caractère chronophage de cette méthode, le passage à l'écrit, même s'il est rigoureux et qu'il prend notamment en compte les silences, ne peut être entièrement fidèle à la multitude d'intonations, d'hésitations, etc. qui s'expriment à l'oral. Autrement dit, le passage à l'écrit comprend une première interprétation du discours recueilli. Bourdieu parle même de « traduction », puisque la transcription implique d'après lui toute une série de choix (Bourdieu, 1993). En outre, certaines digressions incluses dans les entretiens finissent par sortir des problématiques étudiées. Conserver ou supprimer ces fragments du discours est aussi un choix qui revient au chercheur. Cela constitue donc déjà une interprétation de sa part concernant le lien potentiel entre la digression et sa thématique, et concernant aussi sa sensibilité et son éthique. Lorsque les entretiens ne sont pas retranscrits la phase de préparation des entretiens prend la forme de plusieurs écoutes.

Certains autres argumentent que sous leur forme enregistrée, les entretiens sont plus fidèles et donc dans un certain sens plus riches que les résultats obtenus après les retranscriptions. En outre, la répétition des écoutes comprend un intérêt particulier. Kauffmann (2011) fait référence à un processus de « fermentation » du contenu. Cette formule fait allusion à plusieurs écoutes attentives voire méticuleuses, qui sont accompagnées de prises de notes. Van Campenhoudt et Quivy, (2011) expliquent que dans un premier temps, les écoutes doivent être suffisamment attentives pour permettre de « décrire » les discours. Deux niveaux de description se distinguent : le premier est factuel, c'est-à-dire qu'il reprend en tant que telle l'information contenue dans les discours ; l'autre pourrait être appelé « discursif » car il décrit le discours en lui-même. C'est le second niveau qui est visé dans le cadre de l'analyse de contenu.

Après cette première prise en main de chaque entretien, l'organisation des discours revient à « réduire les textes à des propositions claires » et ce, afin « de rapprocher ou au contraire de séparer les énoncés selon le degré d'analogie ou de différence » (Berthier, 2006). Cette phase permet d'entrer dans l'interprétation des données et le rapprochement des différents discours composant le corpus. Selon la terminologie de Van Campenhoudt et Quivy (2011) elle permet d'« agréger » les données<sup>173</sup>. Il s'agit de

---

<sup>173</sup> Il est notable que cette formule soit la même que dans le cadre de la construction d'indices (Section 1.1.3).

l'étape qui utilise un logiciel dans les études lexico-métriques ou quantitatives, et qui se fait à travers l'élaboration de la grille d'analyse dans les analyses thématiques. La grille est alors systématiquement appliquée à tout le corpus. Cette précaution garantit la systématisation de l'analyse en instaurant « un intermédiaire objectif entre le chercheur et son matériau » (Van Campenhoudt et Quivy, 2011). La formule insiste sur l'importance que revêt le travail d'organisation dans les approches thématiques, mais elle met aussi en avant le fait qu'il ne s'agit que d'une étape liminaire de l'analyse. La grille n'est pas présentée comme le produit fini de la recherche : c'est un intermédiaire. Autrement dit le chercheur s'appuie dessus, mais pour mieux la dépasser.

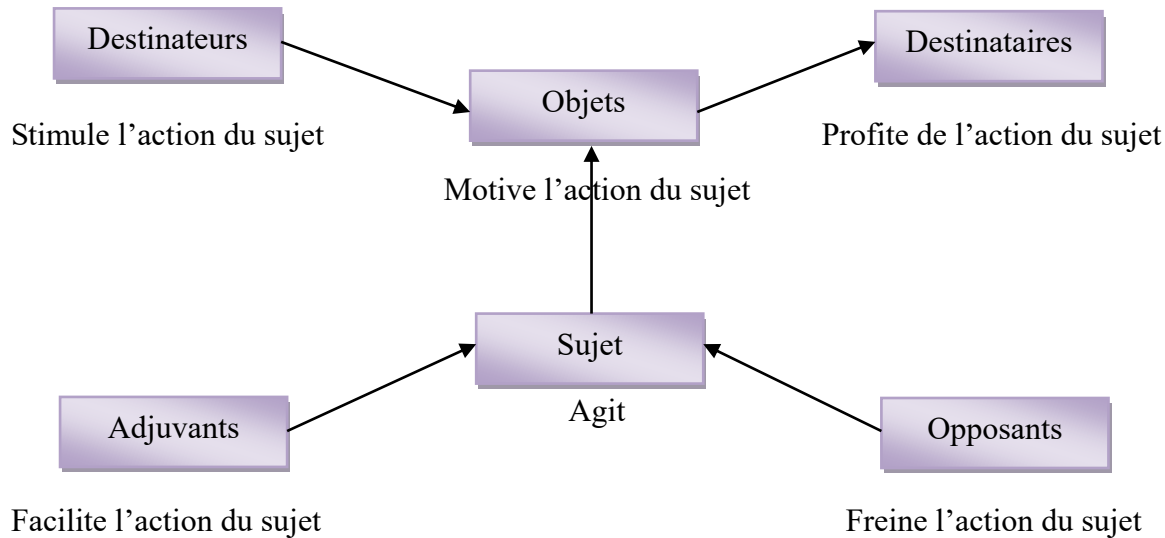
Dans le cas présent deux écoutes ont été menées de manière systématique. Le niveau d'écoute factuel est dépassé grâce aux prises de notes opérées lors de l'entretien et juste après. Puis une première écoute est réalisée pour aborder systématiquement les entretiens du point de vue discursif. Cela consiste finalement en un *brain storming* durant lequel le chercheur se met au service du discours étudié. Le chercheur obtient finalement des prises de notes comparables à un plan détaillé et annoté de l'enregistrement : les mots employés dans ses prises de notes sont d'ailleurs ceux de l'entretien. La seconde écoute étant déjà nourrie par une vision globale du corpus, elle est plus avertie et permet de situer chaque entretien au sein du corpus et de rapprocher les éléments d'analyse entre eux. Cette phase fait appel à la grille d'analyse décrite dans le point suivant. Il faut signaler à ce stade que dans la phase finale de l'analyse, celle de la mise en forme une troisième écoute, partielle cette fois, est réalisée de manière méthodique et non plus systématique. En l'occurrence, les phases d'organisation et d'analyse reposent sur la grille d'analyse qui est présentement construite dans un objectif de clarté et de synthèse.

- Grille d'analyse, inspirée par le schéma actantiel pour opérer une synthèse AFFOM

Le corpus organisé et les entretiens sont comparés et mis en perspectives les uns avec les autres afin de former le cœur de l'analyse qui prend présentement les formes d'une synthèse et d'un tableau AFFOM pour répondre aux exigences associés à l'aide à la prise de décision (Section 1.4.3). A cette fin les discours sont analysés à partir du schéma actantiel (Greimas, 1976).

« Pour Greimas, tout discours ou récit s'organise autour d'un enjeu, autour d'une quête. L'analyse de sa structure doit permettre de faire émerger sa signification » (Van Campenhoudt et Quivy, 2011). L'auteur

défini alors la structure du discours à partir des éléments qui le composent et notamment en fonction des personnes auxquelles il fait référence. Ces éléments, humains ou non humains sont appelés des actants. Le schéma actantiel repris dans la Figure 10 décrit le positionnement de six types d'actants dans le discours.



**Figure 10: Schéma actantiel, élaboré à partir de Van Campenhoudt et Quivy (2011)**

Il apparaît alors qu'en plus des traditionnels objets (thème) et sujet du discours (émetteur), quatre autres actants interviennent : les destinateurs, les destinataires, les adjuvants et les opposants<sup>174</sup>. Dans le cadre de la présente étude, les discours collectés portent sur la gestion de l'eau. Les entretiens et les observations participantes ont en effet été menés de telle sorte à ce que l'objet du discours corresponde aux pénuries en eau. En outre, les actants sujet, opposants, et adjuvants se réfèrent directement au système d'acteur. Le sujet du discours est l'acteur enquêté lui-même. Les opposants sont les acteurs avec lesquels l'émetteur du discours entretient des relations conflictuelles, et les adjuvants sont ceux avec lesquels ils collaborent. Enfin, les actants destinateurs et destinataires peuvent aussi bien désigner des êtres vivants – entre autres des humains – que des entités physiques ou même immatérielles. Dès lors les destinateurs qui poussent le sujet à agir peuvent être compris comme les problèmes face auxquels le sujet ses stratégies d'action. De la même façon, les destinataires qui profitent en théorie de l'action,

<sup>174</sup> Pour plus d'informations cf. Greimas (1976), *Sémiotique des sciences sociales*, Paris, Seuil.

peuvent être compris comme les perspectives qui s'ouvrent au cours de l'action et vers lesquels tend le sujet.

De cette manière, le schéma actantiel permet d'identifier la rencontre des pratiques, des représentations et des pouvoirs dans le cadre de la régulation sociale. Autrement dit, son application est pertinente pour étudier les relations au sein du système d'acteur et apporte de ce fait des informations concernant la vulnérabilité sociale et les capacités d'adaptation du socioécosystème. La mise en forme de cette analyse qui fait intervenir une multitude d'acteurs et de relations se veut synthétique. A cette fin, elle est structurée autour de deux axes préétablis. Le premier axe porte sur les vulnérabilités sociales en milieux agricoles et les adaptations d'ordre économiques et sociales, tandis que le second s'intéresse aux vulnérabilités et aux capacités d'adaptations associées à la qualité de l'eau et ainsi qu'à la surexploitation des aquifères. En dernier lieu, cette synthèse est traduite sous la forme d'un tableau AFFOM (Section 1.4.3) afin de favoriser la discussion conjointe des résultats de l'IPE-SIG et de l'analyse qualitative. L'utilisation du schéma actantiel est d'autant plus pertinente qu'elle permet de renseigner directement l'analyse AFFOM relative aux sociosystèmes par rapport aux pénuries en eau. En effet, dans la perspective définie par Greimas, (1976) l'objet, le destinataire et le destinataire sont extérieurs au sujet et même au système d'acteur : ces actants permettent donc de définir les opportunités et les menaces qui se présentent aux acteurs. D'un autre côté, l'analyse portant sur les sujets, adjuvants et opposants signalés dans le corpus permet de déterminer les forces et faiblesses du système d'acteur.

En l'occurrence, le tableau ainsi élaboré est aussi rempli à partir des résultats obtenus pour l'IPE-SIG. Les cartes, le tableau et l'analyse sociale constituent donc le diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilité portant sur les pénuries en eau. Ces trois éléments permettent de discuter la vulnérabilité du sociosystème de la région d'étude mais donne aussi des éléments de discussion en ce qui concerne d'une part la vulnérabilité dans l'Etat de Chihuahua, et d'autre part l'élaboration de diagnostic de vulnérabilité interdisciplinaire.

## Conclusions partielles

L'Etat de Chihuahua est caractérisé par de forts contrastes territoriaux qui déterminent trois situations de ressource et d'accès à l'eau :

- ✓ « la Sierra » : pourvue en eau, mais fortement marquée par la marginalité socio-économique ;
- ✓ les « Corridors de développement » : zones désertiques où les aménagements urbains et agricoles permettent de générer des dynamiques économiques notables ;
- ✓ le « Désert » : dépourvu de ressource.

Pour refléter les différentes pénuries en eau correspondantes, l'IPE est construit à partir d'une grande variété d'indicateurs (ceux qui sont directement issus des bases de données publiques sont marqués entre guillemet dans le tableau 27). Ils sont élaborés en sélectionnant des données publiques mexicaines qui présentent l'avantage d'être abondantes malgré des limites notables en ce qui concerne la fiabilité, les perspectives historiques et la qualité de l'eau (Section 2.2). Ces données sont analysées de telle sorte à obtenir des indicateurs en accord avec la littérature spécialisée (Section 2.3).

|                      | Indicateurs (et unités)   | Sources         |
|----------------------|---|-----------------|
| <b>Ressource</b>     | « Ecoulements superficiels moyens » ( $10^3\text{m}$ )  | (CONABIO, 2012) |
|                      | Caractérisation de « climat du Mexique »  |                 |
|                      | « Recharge annuelle moyenne des aquifères » ( $10^6\text{m}^3/\text{an}$ )                        | (CONAGUA, 2018) |
| <b>Environnement</b> | Surexploitation des eaux souterraines ( $10^6\text{m}^3/\text{an}$ )                              | (CONABIO, 2012) |
|                      | Caractérisation de « l'érosion physique du sol »  |                 |
|                      | Analyse de la dégradation de la couverture végétale   |                 |
|                      | Dégradations chimiques associées aux activités agricoles  | (CONAGUA, 2018) |
|                      | « Indice de Qualité de l'Eau »  |                 |
|                      | « Traitement des eaux résiduelles » (%)   |                 |
| <b>Accès</b>         | « Unités de production avec systèmes d'irrigation [...] d'après le système d'irrigation utilisé » | (INEGI, 2018)   |
|                      | « Accès au réseau d'eau potable » (%)   |                 |

|                 |   |                      |
|-----------------|---|----------------------|
|                 | « Accès au services d’assainissement » (%)                      |                      |
| <b>Capacité</b> | Mortalidad infantil (menores de un año) (‰)                     | (INEGI, 2013a)       |
|                 | « Niveau moyen de scolarité »                                   |                      |
|                 | « Ressources financières courantes totales par habitants » (\$) | (CONEVAL, 2016)      |
|                 | « Coefficient de Gini »   |                      |
| <b>Usage</b>    | « Usage par habitant » (litre/habitant/jour)                    | (INEGI, 2013a, 2018) |
|                 | Efficiencia de l’eau agricole (m <sup>3</sup> /\$/ an)          | (INEGI, 2018)        |
|                 | Efficiencia de l’eau industrielle (m <sup>3</sup> /\$/ an)      |                      |

**Tableau 26 : Indicateurs de l’IPE construits à partir bases de données publiques mexicaines**

Tous ces indicateurs sont ensuite normalisés à travers des analyses Fuzzy employant majoritairement des seuils réutilisables – seuls quatre indicateurs n’ont pas pu être normalisés de manière à être réutilisable ailleurs qu’au Mexique – (Section 2.4.1). L’objectif est de comparer les cartes d’indicateurs correspondantes avec la présentation de la région d’étude (Section 3.1) afin de discuter leur pertinence pour élaborer un diagnostic interdisciplinaire et standardisé de pauvreté en eau à Chihuahua. Puis trois scénarios sont employés pour les agréger (Section 2.4.2).

Scénario 1 (IPE-SIG municipal). A partir des cartes d’indicateurs ainsi réalisées, un premier scénario est calculé. Les indicateurs socio-économiques se présentent sous leur forme municipale, tandis que la majeure partie des indicateurs d’environnement et de ressource conservent leurs représentations cartographiques spécifiques. En conséquence, les résultats finaux associent des délimitations municipales et d’autres qui ne le sont pas ; dans les cartes correspondantes les milieux urbains, ruraux et agricoles ne se distinguent pas en terme d’accès ni de capacité. Ces résultats sont obtenus en opérant des moyennes pondérées pour obtenir les cinq composantes traditionnelles de l’IPE et les intégrer ensuite dans un résultat final (Section 3.2). L’agrégation des composantes est réalisée à travers la formule agrégative traditionnelle (Equation 1), qui n’est autre qu’une moyenne pondérée. Le même coefficient est attribué à tous les indicateurs d’une même composante, et la même stratégie est adoptée pour les composantes afin de ne pas attribuer plus d’importance à l’un ou l’autre des facteurs ou des composantes de l’IPE. Ce premier scénario doit permettre d’observer conjointement les dimensions physiques et



socio-économiques de la pauvreté en eau, c'est pourquoi il est aussi comparé à l'IDH (qui est de nature exclusivement socio-économique). Pour cela, l'IPE-SIG municipal est soustrait à l'IDH qui se trouve être la composante Capacité utilisée pour calculer l'IPE-SIG municipal.

Ces premiers résultats sont ensuite complétés par une modélisation de l'IPE-SIG qui fait varier la visibilité des problématiques agricoles et rurales dans les résultats. Pour cela, deux scénarios viennent s'ajouter au premier. Comme dans l'IPE-SIG municipal, les scénarios 2 et 3 emploient la même pondération (0,20) pour les cinq composantes de l'IPE.

Le scénario 2 est appelé IPE-spatialisé. Ce second scénario applique strictement les opérations d'agrégation employées dans le scénario 1. En somme, il opère une moyenne pondérée aux composantes (en employant un coefficient de 0,20 pour chacun d'elles). En revanche, il diffère du scénario en ce qui concerne la spatialisation des indicateurs socio-économiques. Concrètement les cartes A2, A3 et C2 distinguent les ensembles urbains et ruraux. Cette distinction est réalisée à partir de deux critères :

- ✓ la concentration de la population ;
- ✓ la détection de zones bâties.

Les trois cartes d'indicateurs résultantes représentent dans chaque municipalité les données relatives aux communautés rurales dans les aires sans construction humaine (Carte 8). Au contraire, les données relatives aux villes y sont représentées sur les zones bâties. En parallèle, les cartes des indicateurs A1 et U2 distinguent les aires agricoles de celles qui ne le sont pas. La valeur des indicateurs agricoles est ainsi représentée sur les aires agricoles, tandis que le reste du territoire obtient des aptitudes neutres (Carte 8).

Le scénario 3 est appelé IPE-OWA. Ce troisième calcul est opéré à partir des mêmes cartes d'indicateurs que le scénario 2 (à savoir que certains d'entre eux distinguent donc les ensembles urbains et ruraux, ainsi que les aires agricoles et non agricoles). Mais contrairement aux deux premiers scénarios, il réduit la compensation existant entre les composantes de l'IPE. Pour cela l'agrégation est opérée à travers une OWA. L'équation employée reste agrégative, mais elle se distingue de l'équation 1 en ajoutant des poids d'ordre (Section 1.4.2 et 2.4.2). Dans ce cadre, des stratégies de compensation et de prise de risque doivent être déterminées en fonction des objectifs de calcul. Il convient de rappeler que l'objectif est de

discuter la visibilité des facteurs de pauvreté en eau potentiellement problématiques dans l'état de Chihuahua (l'IPE étant calculé dans le cadre d'une étude sur les vulnérabilités hydriques chroniques). C'est pourquoi la stratégie adoptée comprend peu de risque ainsi qu'une compensation limitée (Stratégie de risque faible, Tableau 7). En attribuant de plus grands poids d'ordre aux aptitudes les plus basses, cette stratégie permet de révéler les problèmes les plus urgents tout en conservant la visibilité des facteurs plus secondaires.

Ces trois scénarios génèrent trois cartes d'IPE-SIG qui sont comparées entre elles. Afin d'enrichir les discussions une carte supplémentaire sert à comparer les résultats obtenus dans les scénarios 1 et 2 : elle est obtenue en soustrayant l'IPE-SIG spatialisé à l'IPE-SIG municipal.

En plus de ces analyses cartographiques, une analyse qualitative des discours permet de zoomer sur la vulnérabilité sociale de la sous-région de Delicias. Cette zone d'étude fait partie des corridors de développement et associe de fortes dynamiques économiques avec un climat semi-aride. Il est notable que le développement y prend notamment la forme de la troisième plus grande ville ainsi que du plus grand DR de l'Etat (à savoir le DR005) ; et ce, parallèlement à des structures qui trouvent leur légitimité à travers l'histoire de la sous-région. En outre, les enjeux de gestion propre à ce territoire sont complexifiés par le fait qu'elle est située dans la Région hydro-administrative du Río Bravo (Carte 3). La vallée correspondante entre à ce titre dans le cadre de traités internationaux entre le Mexique et les USA. Et il faut ajouter que :

- ✓ la zone d'étude est affectée par des épisodes de sécheresse intenses depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle ;
- ✓ les pratiques agricoles y génèrent une surexploitation des aquifères ;
- ✓ des contaminations inquiétantes en arsenic y ont été signalées ;

Pour étudier les facteurs sociaux de vulnérabilité sur ce territoire, 70 entretiens ont été collectés au moyen d'entretiens compréhensifs et de pratiques d'observation participante. La collecte s'est concentrée dans quatre municipalités (Delicias, Meoquí, Julimes, et Rosales) qui sont liées par une histoire, et des systèmes d'acteurs interconnectés notamment en ce qui concerne la gestion de l'eau d'irrigation.

Dans ce territoire, l'échantillon a été élaboré de manière à interviewer les deux sous-branches du système d'acteur de gestion de l'eau, à savoir celles de l'eau potable et de l'assainissement d'une part et

celle de l'irrigation d'autre part. A cela s'ajoute une attention particulière concernant les acteurs de l'adaptation, c'est pourquoi quatre catégories d'acteurs sont finalement considérées :

- ✓ Producteurs avec technification ;
- ✓ Producteurs sans technification ;
- ✓ Autorités de l'irrigation ;
- ✓ Acteurs de la gestion de l'eau potable ;
- ✓ Supports de l'adaptation (définis comme des acteurs qui ne font pas directement partie du système de gestion de l'eau mais qui impactent cette gestion par leurs relations avec certains acteurs qui eux en font partie).

Ces catégories amènent à interviewer d'autant plus de producteurs (40), qu'ils entrent parfois dans plusieurs de ces catégories. L'analyse de leurs discours est effectuée en appliquant une grille d'analyse inspirée du schéma actantiel qui fait ressortir des éléments d'analyse concernant les relations existant dans le système d'acteur, mais aussi les opportunités et les menaces du sociosystème dans le contexte écosystémique du territoire. L'analyse ainsi établie s'intéresse aux fragilités institutionnelles, culturelles et aux capacités socio-économiques des acteurs pour s'adapter aux pénuries en eau (Sections 3.4.1 et 3.4.2).

En outre, l'utilisation du Schéma de Greimas permet d'identifier les informations qui entrent dans les analyses AFFOM. Cette démarche permet de synthétiser l'analyse sociale et de la faire dialoguer avec l'IPE-SIG pour enrichir le diagnostic de vulnérabilité (Section 3.4.3).

**Partie 3 : Diagnostics de vulnérabilité dans l'Etat de Chihuahua, résultats et discussions de du calcul de l'IPE-SIG et de l'analyse des discours d'acteurs**

○ **Cartes d'indicateurs normalisés grâce aux outils SIG (cartes raster et « FUZZY »)**

Les indicateurs employés pour calculer l'IPE-SIG sont élaborés à partir de données cartographiques mais aussi statistiques (Section 1.4). Certains sont donc issus d'opérations statistiques, tandis que d'autres proviennent d'analyses cartographiques (Section 2.2). Néanmoins, ils sont ensuite tous transcrits sous la forme de cartes raster et standardisés au moyen de fonctions d'appartenance issue de la logique floue (outil « FUZZY » implémenté dans TerrSet) afin d'uniformiser leurs diverses unités et échelles (Section 2.4.1). Cette section analyse et discute les résultats intermédiaires de l'IPE-SIG, obtenus après la phase de standardisation des indicateurs. Il s'agit dans un premier temps d'observer la variation des aptitudes obtenues pour chaque carte d'indicateur en prêtant attention aux comportements adoptés par les différentes entités territoriales et administratives qui composent l'Etat (Annexe 1). Dans un second temps ces variations sont discutées en fonction des trois critères considérés pour leur élaboration : disponibilité et la spécificité des données, réutilisation des seuils de normalisation, et cohérence avec la littérature spécialisée (Section 3.1.3).

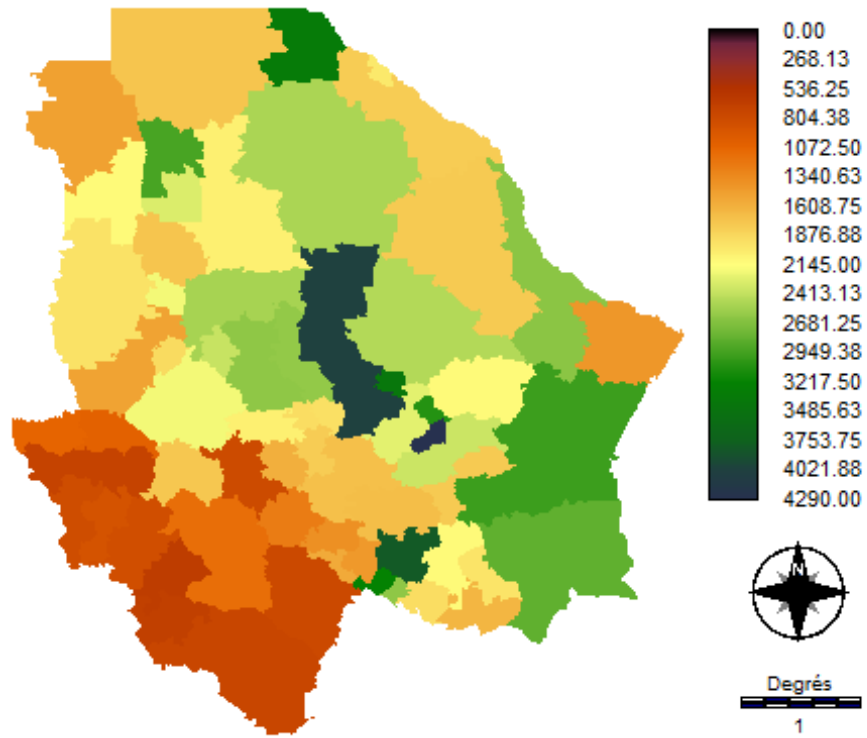
3.1.1 *Présentation des cartes d'indicateurs socio-économiques standardisés avec la méthode « FUZZY »*

Les indicateurs socio-économiques qui composent l'IPE-SIG sont exclusivement élaborés à partir de données statistiques. Dans la première alternative de calcul ils ont été spatialisés à l'échelle municipale. La spatialisation adoptée pour construire les scénarios et leurs variations (emploi de la technique des poids d'ordre, dite OWA détaillée dans les sections 1.4.2 et 2.4.2) n'est discutée que dans la section 3.3.2 car elle soulève des questions très spécifiques. A ce stade, les indicateurs sont donc commentés sous la forme des cartographies municipales correspondantes.

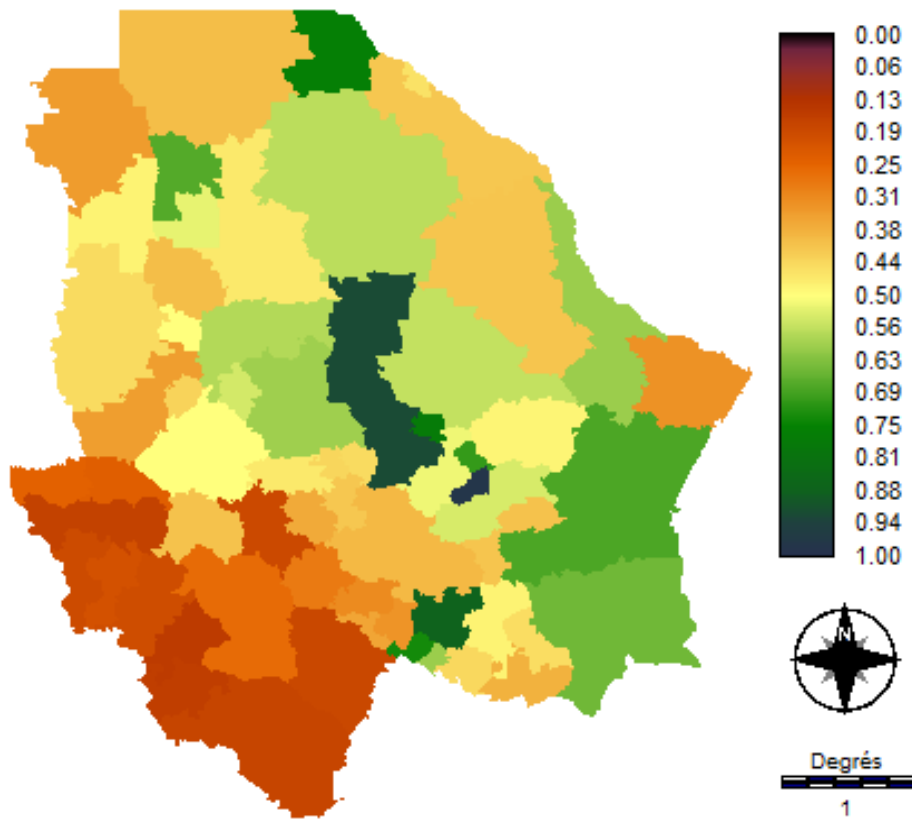
- Indicateurs de capacité

La composante de capacité comprend quatre indicateurs, dont les normalisations présentent des constantes et des variations. En particulier, les indicateurs de revenus (C1) et d'éducation (C3) ont des comportements similaires (Carte 12, Carte 14), qui les différencient de ceux de cohésion sociale et de mortalité infantile (Carte 16, Carte 18).

Tout d'abord les résultats C1 et C3 couvrent de larges rangs d'aptitudes, respectivement [0,18 - 0.98] et [0.30- 0.96]. A travers eux, la Sierra se distingue nettement du reste du territoire puisqu'elle concentre les aptitudes les plus faibles de l'Etat. Et au contraire, les municipalités de Chihuahua, Juárez, Delicias et Hidalgo del Parral se démarquent en atteignant les plus fortes aptitudes. En dehors de ces deux ensembles, les cartes confèrent notamment des aptitudes inférieures à 0,40 à Janos (au nord ouest), à Manuel Benavides (à l'extrémité est de l'Etat) et à Coyame de Sotol (à l'est de l'ensemble désertique). Au contraire, Jiménez et Camargo (dans le sud), mais aussi Cuauhtémoc (à l'est de Chihuahua), et Nuevo Casas Grandes (au nord-ouest de l'Etat) obtiennent des scores supérieurs ou égaux à 0,60. Enfin, il apparaît que quelques municipalités situées entre Jiménez et Parral reçoivent des aptitudes plus faibles que le reste du sud-est de l'Etat.



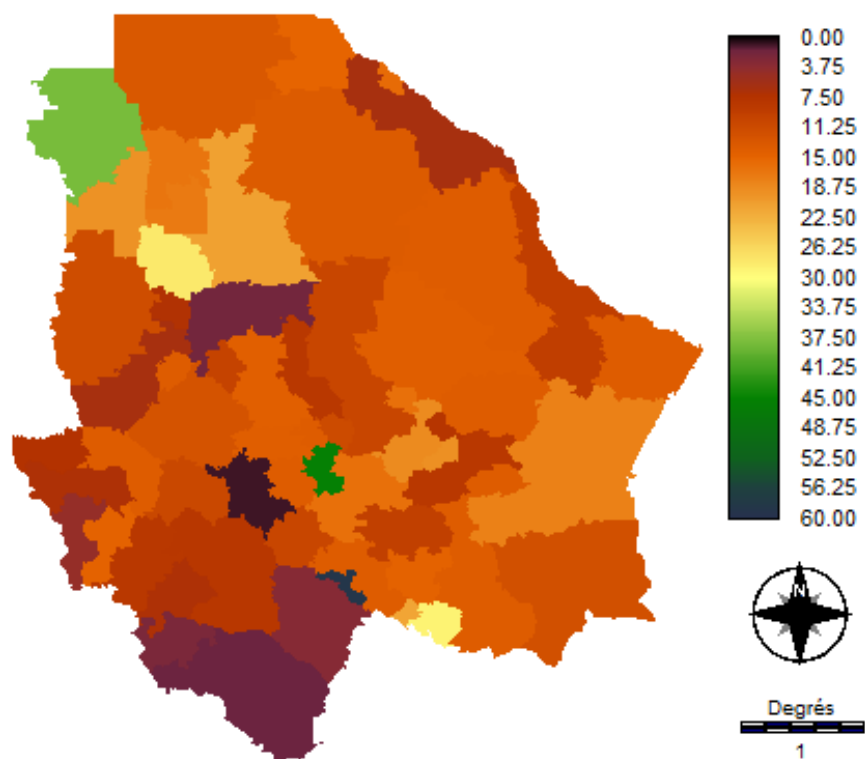
Carte 11 : Indicateur de revenu, C1



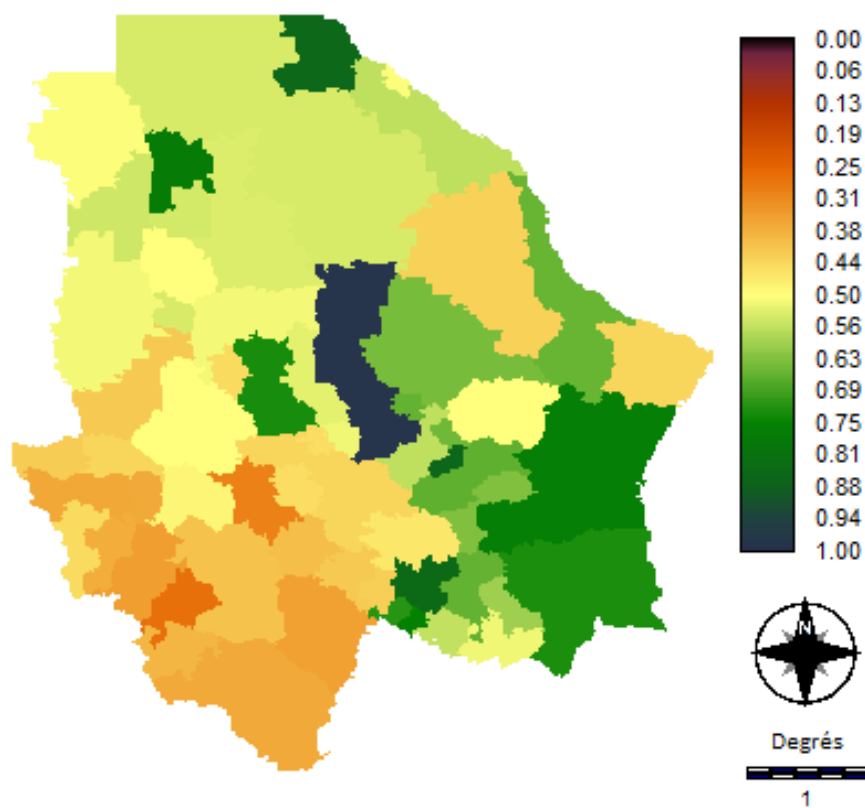
Carte 12 : Indicateur de revenu normalisé, C1

Sachant que les résultats de C3 sont globalement supérieurs à ceux de C1, quelques variations distinguent les deux cartes ; la plus visible consiste dans la forte aptitude de Chihuahua en ce qui concerne C3. Finalement, ces cartes mettent en avant d'un côté les pôles d'activités (avec de fortes aptitudes) et de l'autre les espaces marginalisés de l'Etat dont les scores indiquent des situations problématiques. Elles établissent d'ailleurs entre ces deux ensembles une hiérarchisation cohérente avec le panorama socio-économique habituellement décrit.





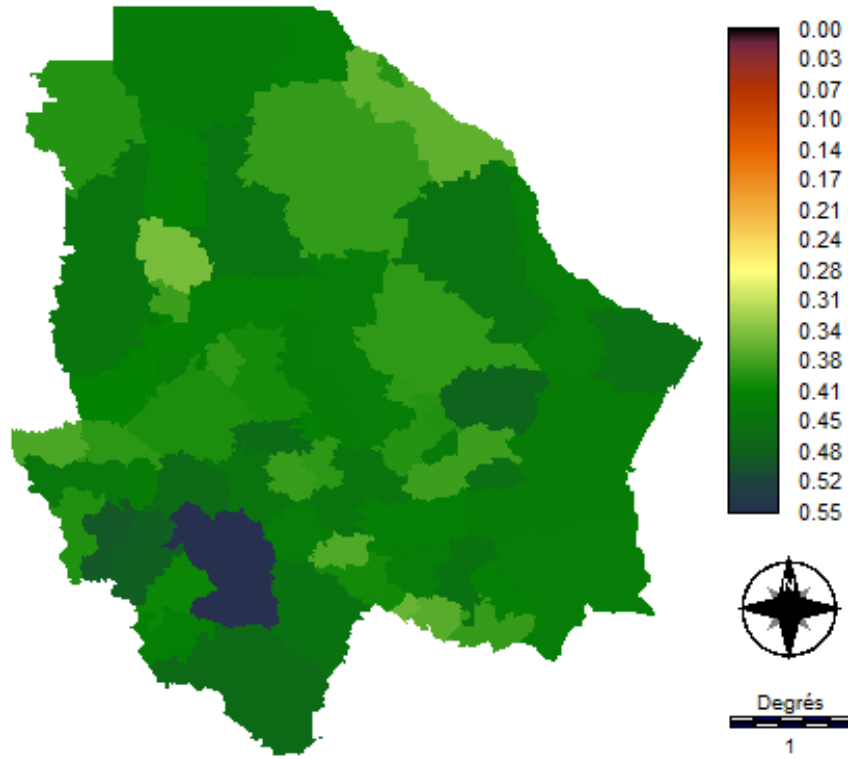
Carte 13 : Indicateur d'éducation, C3



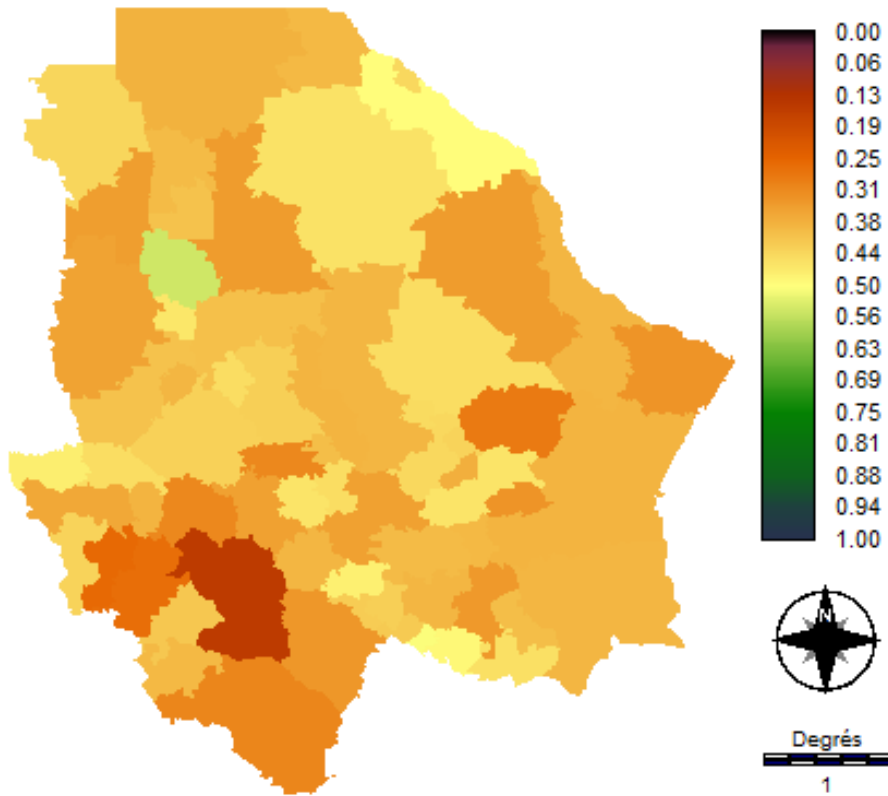
Carte 14 : Indicateur d'éducation normalisé, C3

En ce qui concerne C1b et C3, les cartes dessinent des panoramas différents. Ces deux panoramas sont inversés : le territoire paraissant relativement problématique en ce qui concerne la cohésion sociale (C1b allant de 0,15 à 0,55) ; et très apte en ce qui concerne la mortalité infantile (C3 allant de 0,37 à 1).

Néanmoins, certaines variations au sein de la cohésion sociale (C1b) de l'Etat sont comparables à celles de C1 et C3. En effet, la Sierra montre sur une cohésion sociale plus faible que le reste du territoire, Guachochi étant la municipalité où cet indicateur apparaît le plus problématique. Et c'est aussi les cas de Manuel Benavides et Coyame del Sotol, qui avaient été signalés négativement dans C1 et C3.

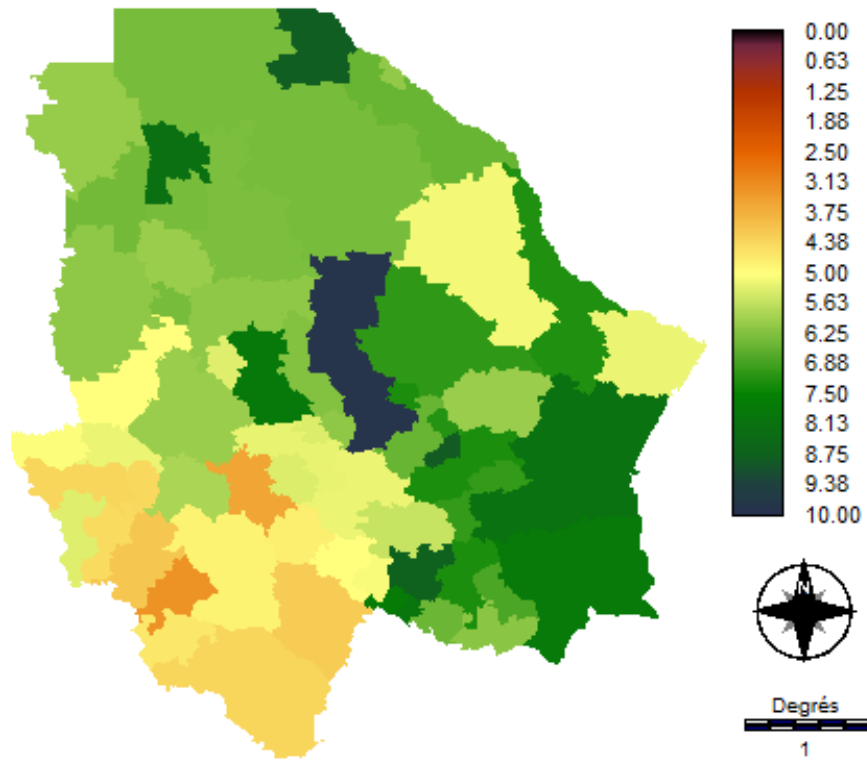


Carte 15 : Indicateur de cohésion sociale, C1b

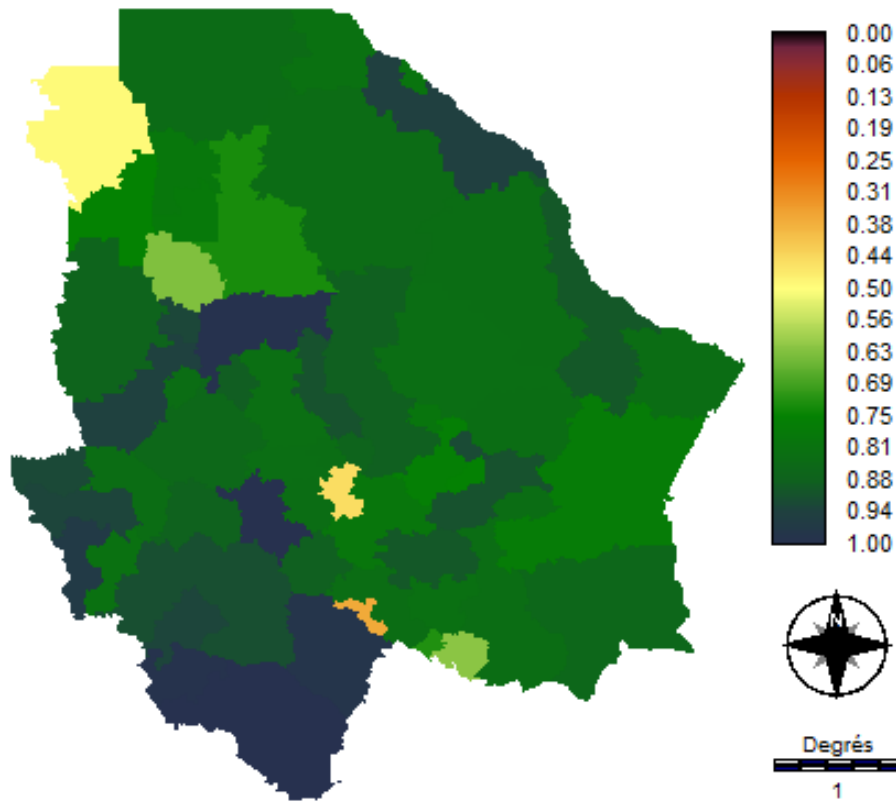


Carte 16 : Indicateur de cohésion sociale normalisé, C1b

Ces similitudes sont d'autant plus importantes à noter que l'indicateur de mortalité infantile (C2) indique un clivage contraire aux trois autres indicateurs : la Sierra présentant les plus faibles cas de mortalité infantile de l'Etat. Pour conclure, les faibles aptitudes de la Sierra et de quelques municipalités désertiques se retrouvent dans de nombreux indicateurs d'accès et de capacité.



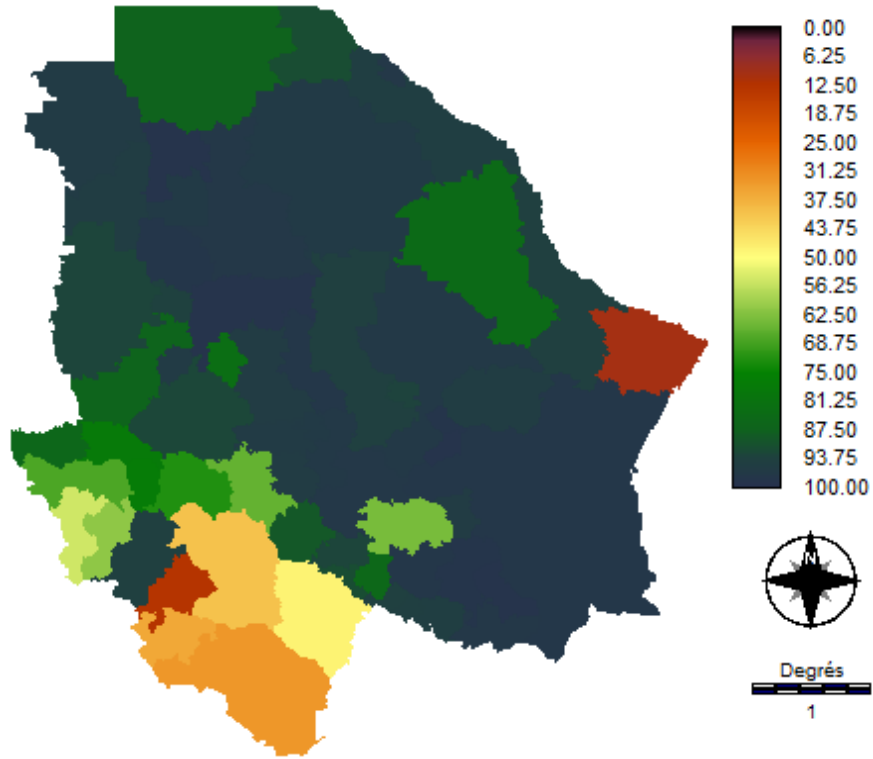
Carte 17 : Indicateur de mortalité infantile, C2



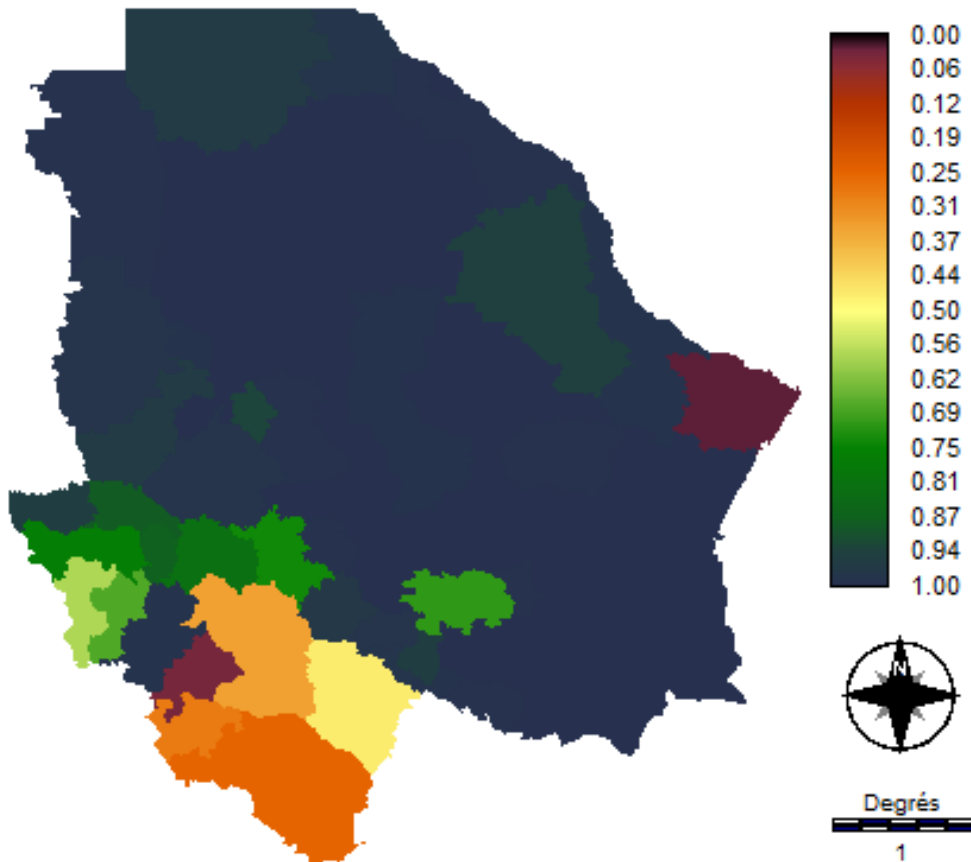
Carte 18 : Indicateur de mortalité infantile normalisé, C2

- Indicateurs d'accès

Les trois indicateurs de la composante d'accès (Carte 20, Carte 22, Carte 24) peignent des panoramas similaires aux deux premiers indicateurs mentionnés pour la composante de capacité C1, et C2. D'une part, ils couvrent des rangs d'aptitudes encore plus larges que C1 et C2, puisque les trois vont respectivement quasiment de 0 à 1. D'autre part, ils indiquent un clivage négatif entre la Sierra et le reste du territoire.



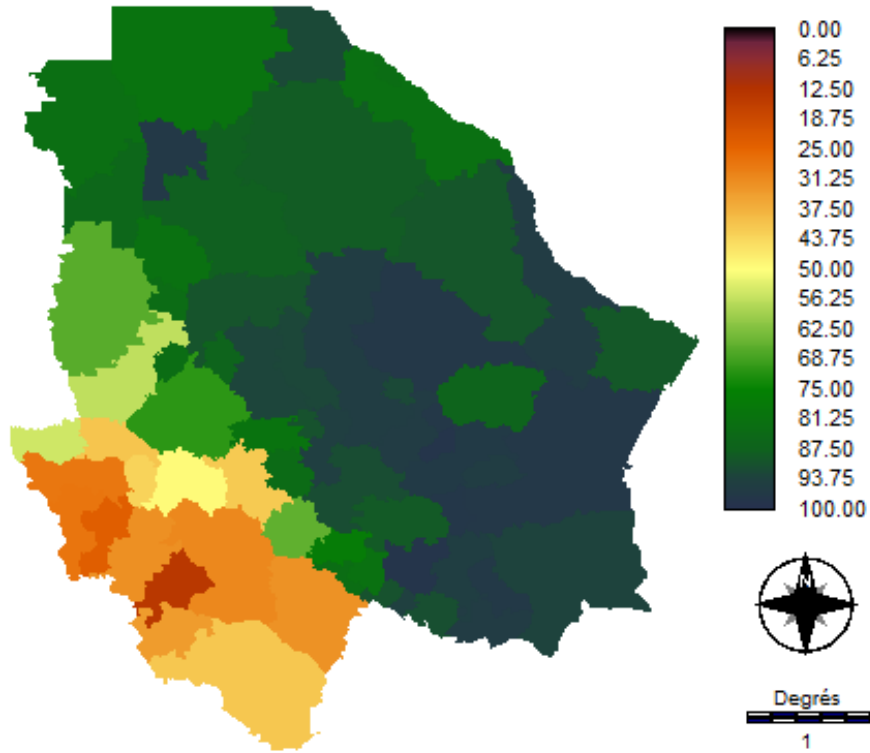
Carte 19 : Indicateur d'accès à l'eau, A2



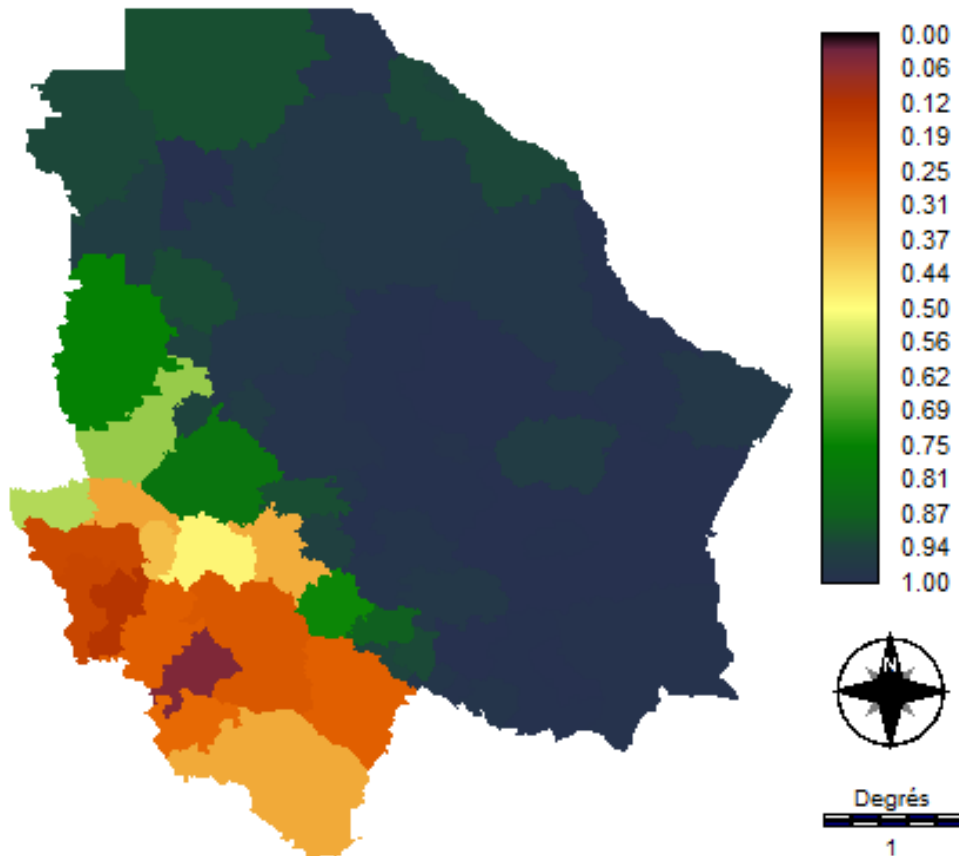
Carte 20 : Indicateur d'accès à l'eau normalisé, A2

En l'occurrence les indicateurs d'accès à l'eau (A2) et d'accès à l'assainissement (A3) confèrent rarement à la Sierra des aptitudes maximales, alors que celles du reste du territoire dépassent majoritairement les 0,90. Malgré ce point commun, quelques nuances différencient les deux cartes. En l'occurrence A3 obtient des scores globalement plus faibles qu'A2. Deux comportements distinguent des ensembles dans la Sierra en ce qui concerne l'accès à l'eau, et ce alors qu'une unité régionale se dégage en termes d'accès à l'assainissement. En effet les municipalités de l'extrémité nord-ouest font montre d'un contexte très favorable d'accès à l'eau, alors que cet accès apparaît problématique dans le sud-est de la région.



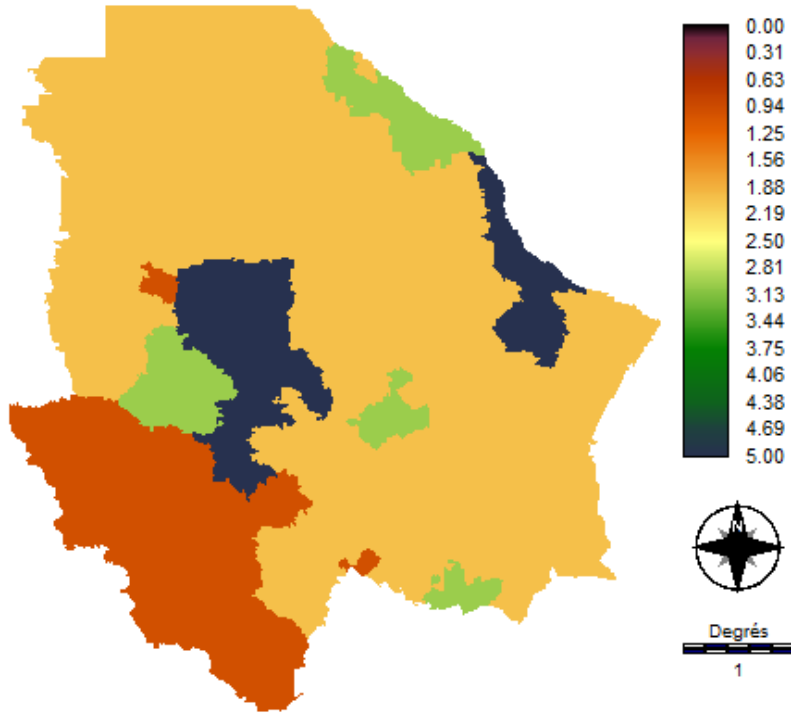


**Carte 21 : Indicateur d'accès à l'assainissement, A3**

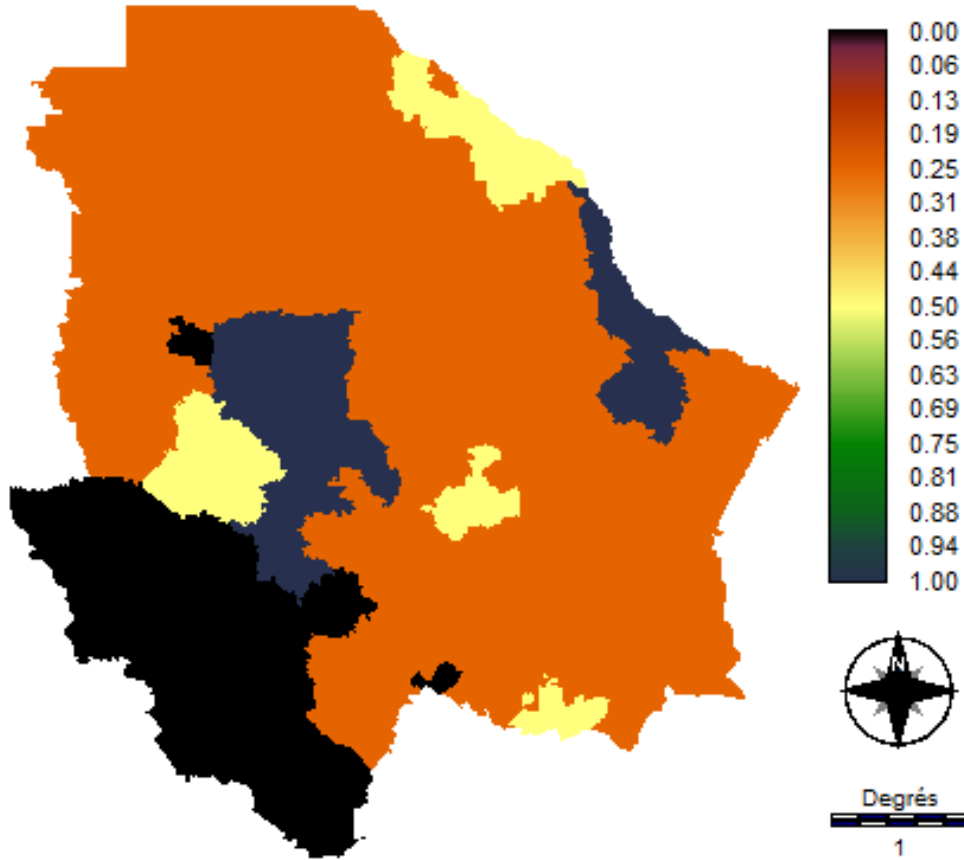


**Carte 22 : Indicateur d'accès à l'assainissement normalisé, A3**

En revanche, Manuel Benavides a un très faible accès à l'eau, alors qu'il compte sur un score maximal d'accès à l'assainissement. Quelques autres cas présentent des variations du même style, mais de manière moins significative que pour Manuel Benavides (ce point est discuté dans la section 3.1.3).



Carte 23 : Indicateur d'accès à l'irrigation, A1



Carte 24 : Indicateur d'accès à l'irrigation normalisé, A1

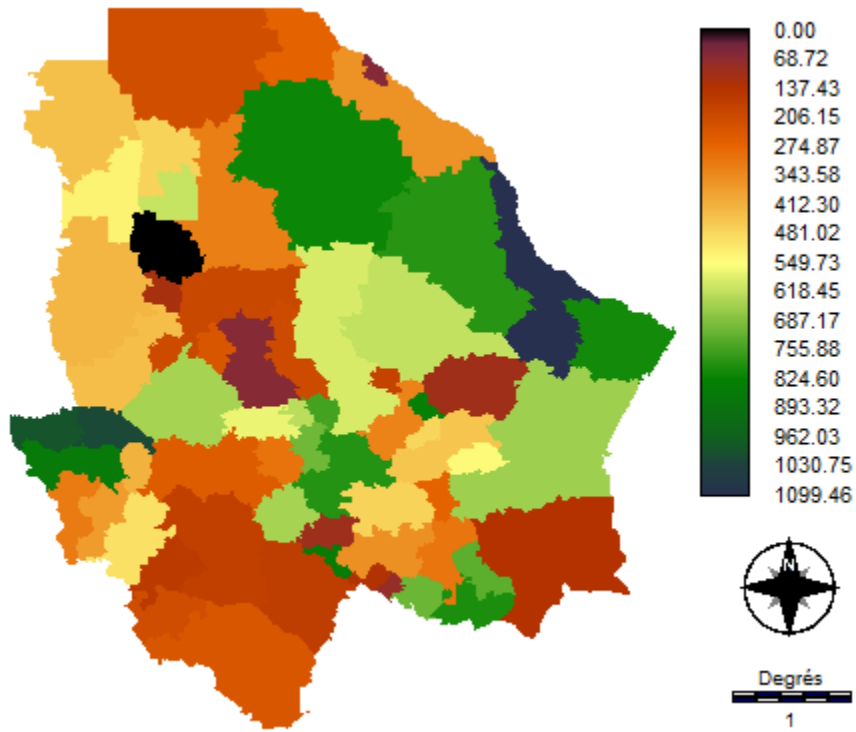
Le troisième indicateur d'accès à l'irrigation confère à tout le sud de la Sierra un score nul, traduisant de ce fait le faible développement de l'irrigation dans ce territoire. Il engendre aussi un panorama plus mitigé dans le reste du territoire *chihuahuense*. La plus grande partie de l'Etat obtient ainsi un score de 0,25, indiquant une aptitude qui reste faible. Et dans ce contexte, seules quelques municipalités caractérisées par des DR se démarquent par des agricultures majoritairement technicisées. En l'occurrence, les régions agricoles de Cuauhtémoc et d'Ojinaga atteignent des aptitudes maximales, tandis que Guadalupe, Guerrero, Delicias, ainsi que Coronado ont des aptitudes moyennes.

- Indicateurs d'usage

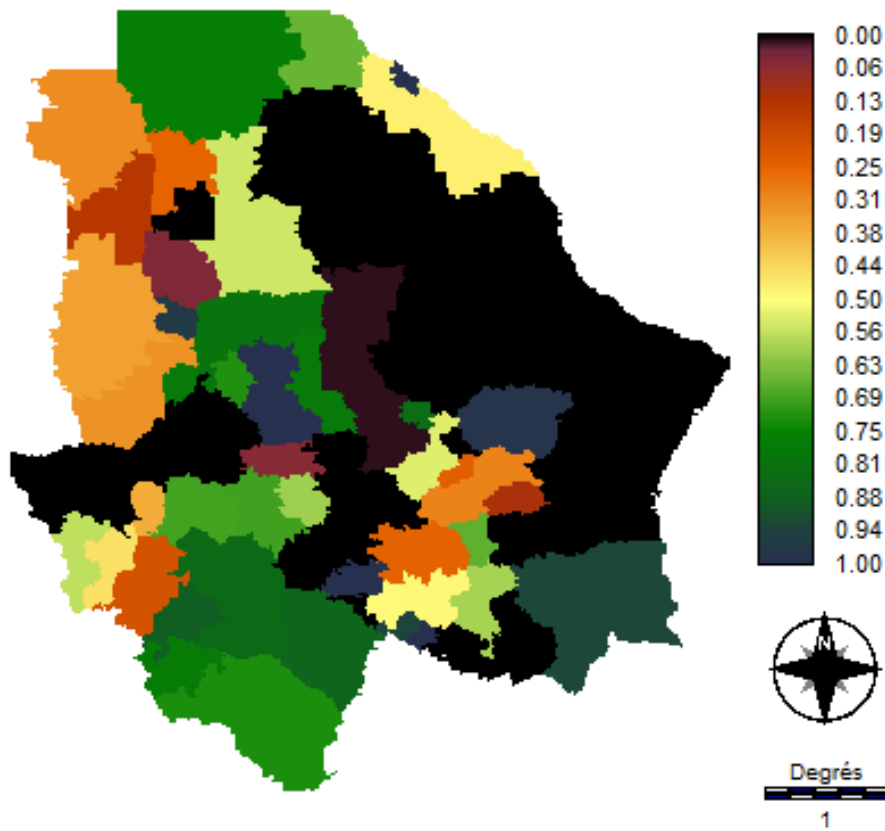
Les indicateurs d'usages dessinent pour leur part des panoramas moins univoques que ceux de capacité et d'accès. Ils transcendent même en partie les unités régionales qui caractérisent traditionnellement l'Etat.

L'indicateur d'usage public (U1) enseigne une diversité telle que le rang des aptitudes va de 0 à 1 (Carte 26). Cette diversité engendrée par l'adaptation des seuils employés pour normaliser l'indicateur pour les rendre pertinent dans le contexte mexicain est discutée dans la section 3.1.3. Une fois de plus, l'ensemble de la Sierra est divisé en deux parties : le sud atteint des aptitudes supérieures à 0,70, et celles du nord vont de 0,56 à 0. Dans le reste du territoire la diversité domine aussi. Les municipalités désertiques ont des aptitudes nulles, tandis que quelques municipalités notablement productives reçoivent de fortes aptitudes : Juárez et Ahumada, Cuauhtémoc et les municipalités qui les environnent, et Jiménez qui fait exception dans le sud de l'Etat.

Néanmoins, la carte attribue de faibles aptitudes d'usage public dans la majeure partie de l'Etat. En particulier, Chihuahua et les municipalités qui constituent le cœur du désert à l'est de l'Etat ont des scores équivalents ou égaux à 0. Cette problématique doit avant tout être associée aux pratiques d'agriculture et d'élevage qui se développent grâce à la ressource dite publique.



Carte 25 : Indicateur d'usage public, U1

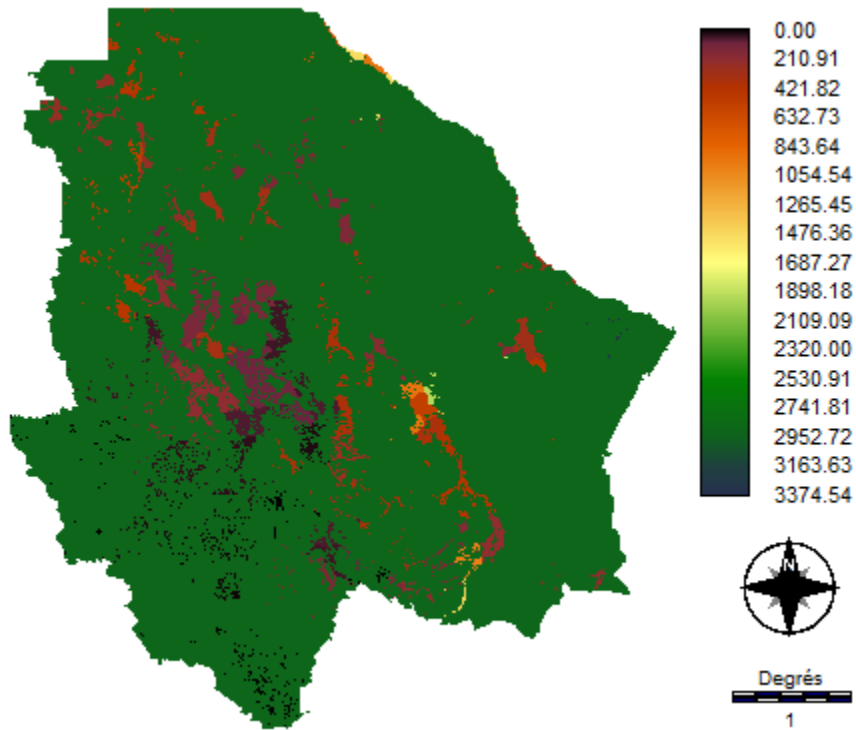


Carte 26 : Indicateur d'usage public normalisé, U1

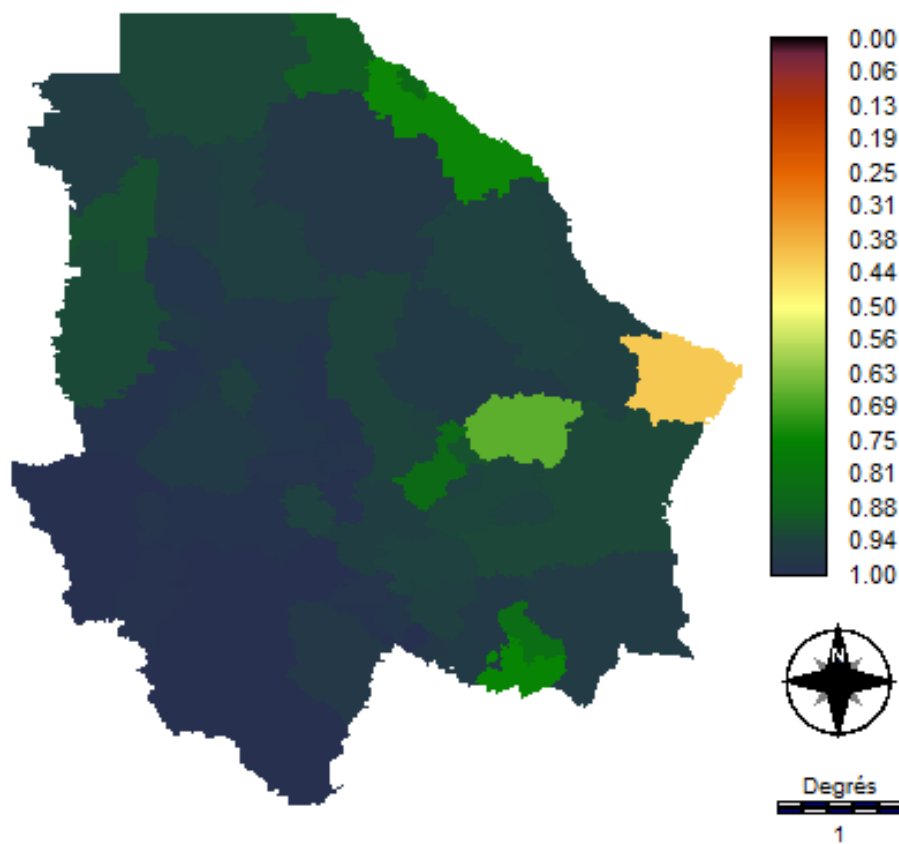
L'Etat se caractérise au contraire par des aptitudes fortes et uniformes en ce qui concerne les usages économiques (

Carte 28 ; Carte 30). A l'exception de Manuel Benavides (qui obtient 0,41), l'indicateur d'usage agricole de l'ensemble du territoire considéré est compris entre 0,75 et 1. Et les aptitudes associées à l'usage industriel sont pour leur part égales à 1 pour presque toutes les municipalités concernées par cet indicateur. Les municipalités recensant 0,5 correspondent en effet à celles qui ne recensaient pas de données à ce sujet, et pour lesquelles l'indicateur n'est donc pas considéré comme pertinent (Section 2.3.1 et 2.4.1). Une municipalité au sud de Parral (San Francisco del Oro) n'atteint pas l'aptitude maximum, mais sa situation reste apte avec un score de 0,71 pour l'usage industriel. Enfin, deux municipalités du nord de la sierra reçoivent des aptitudes basses, à savoir Moris et Urique avec une aptitude de 0,44.

Dans ce contexte, comme dans le cas de plusieurs indicateurs de capacité et d'accès, Manuel Benavides obtient de faibles aptitudes tant pour U1 que pour U2.



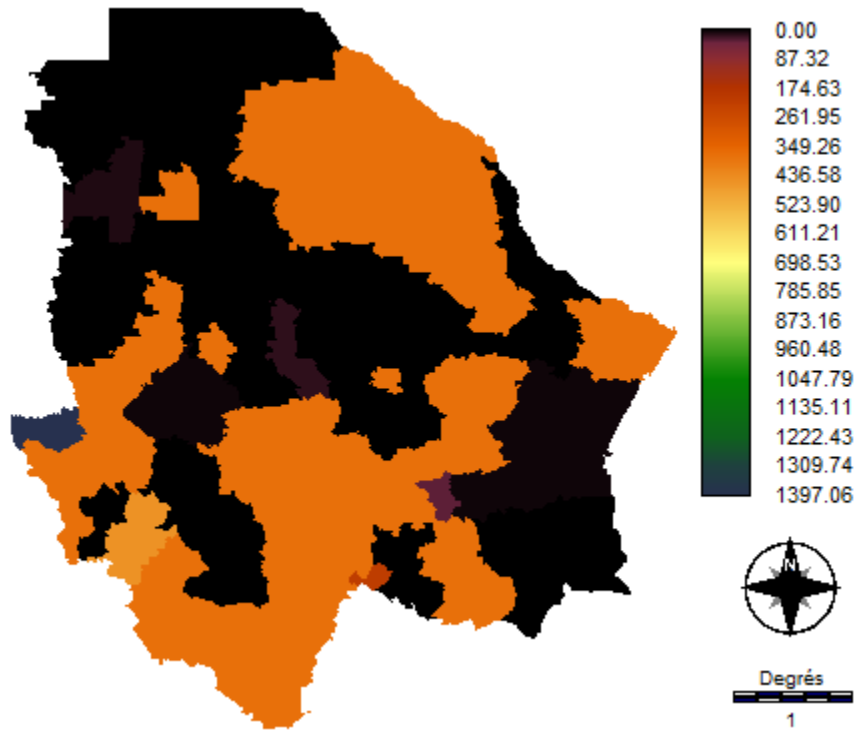
Carte 27 : Indicateur d'usage agricole, U2



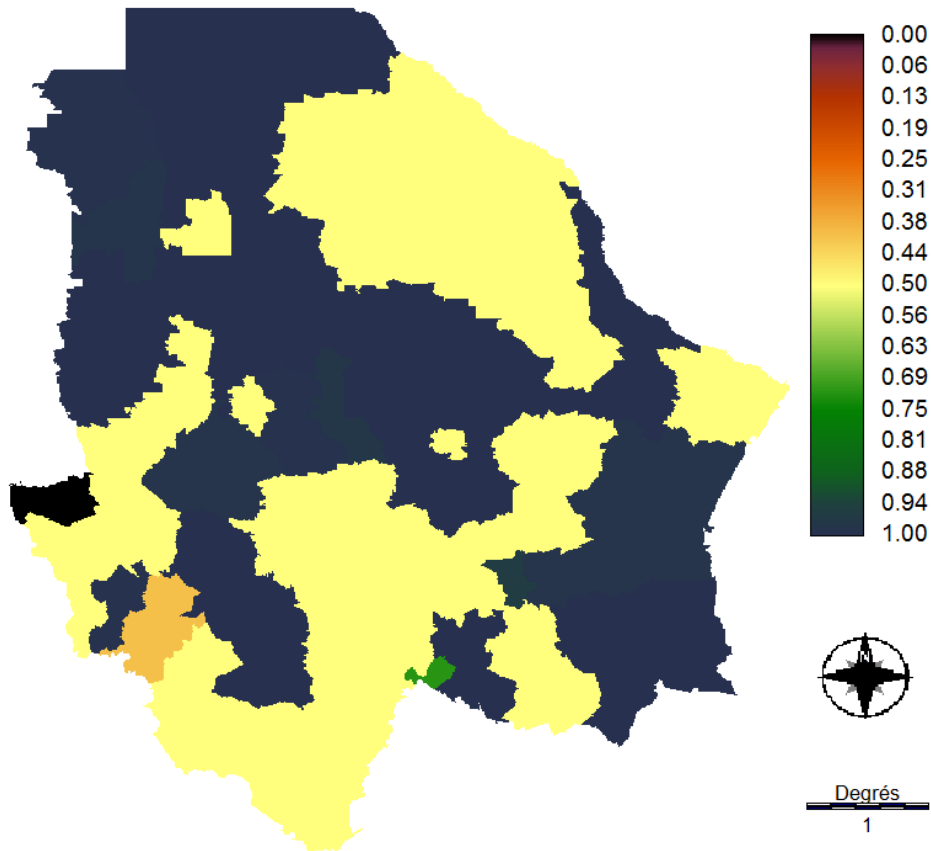
Carte 28 : Indicateur d'usage agricole normalisé, U2







Carte 29 : Indicateur d'usage industriel, U3



Carte 30 : Indicateur d'usage industriel normalisé, U3

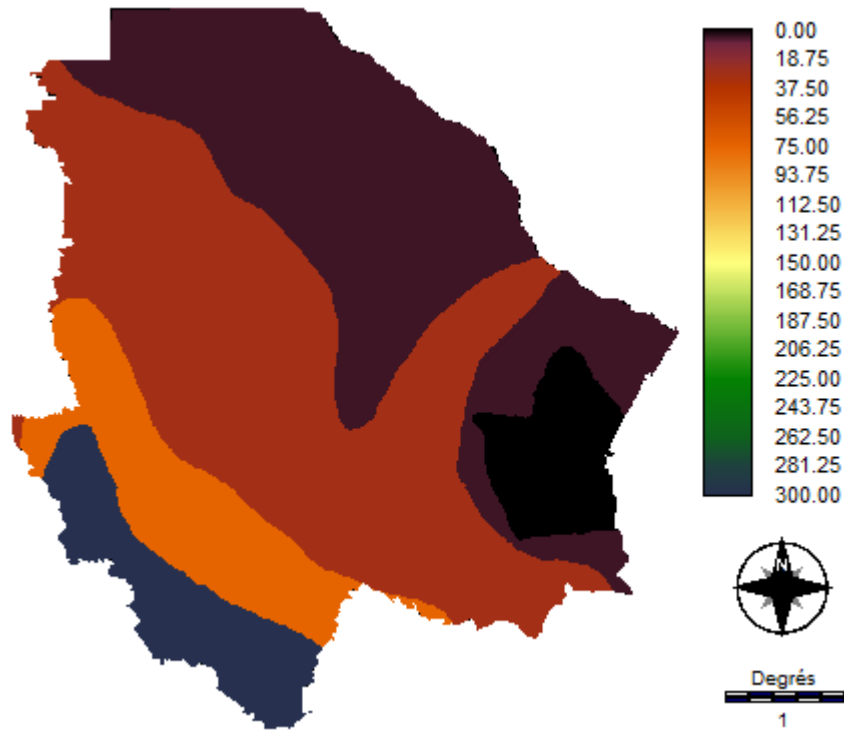
La tendance qui ressort le plus fortement dans les cartes d'indicateurs d'accès, de capacité et d'usage est celle de la marginalité des municipalités de la Sierra. Cela correspond de fait à la présentation qui a été faite de l'Etat de Chihuahua (Section 2.1.1). Les indicateurs hydrologiques et environnementaux dessinent pour leur part un portrait différent de ce territoire administratif.

### 3.1.2 *Présentation des cartes d'indicateurs hydrologiques et environnementaux standardisés avec la technique « FUZZY »*

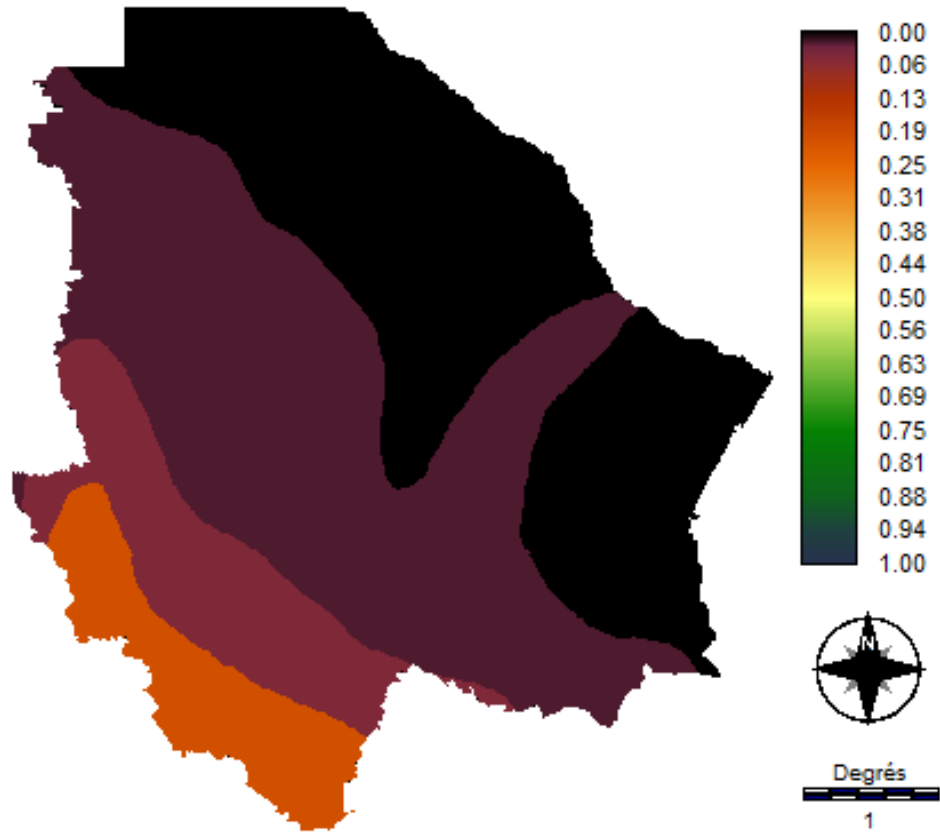
Dans cette étude, l'IPE est calculé – quand cela a été possible – avec d'indicateurs hydrologiques et environnementaux spécifiques, et en conservant la représentation spatiale des données cartographiques correspondantes. Plusieurs indicateurs (R1, R2, M1, M2, Q1) sont de fait construits à partir d'analyses exclusivement cartographiques, tandis que d'autres (R3, M3, Q2, Q3) ont été digitalisés et/ou cartographiés avant d'être soumis à l'analyse « *FUZZY* ». Les neuf cartes ainsi obtenus sont commentées ci-dessous.

- Indicateurs de ressource

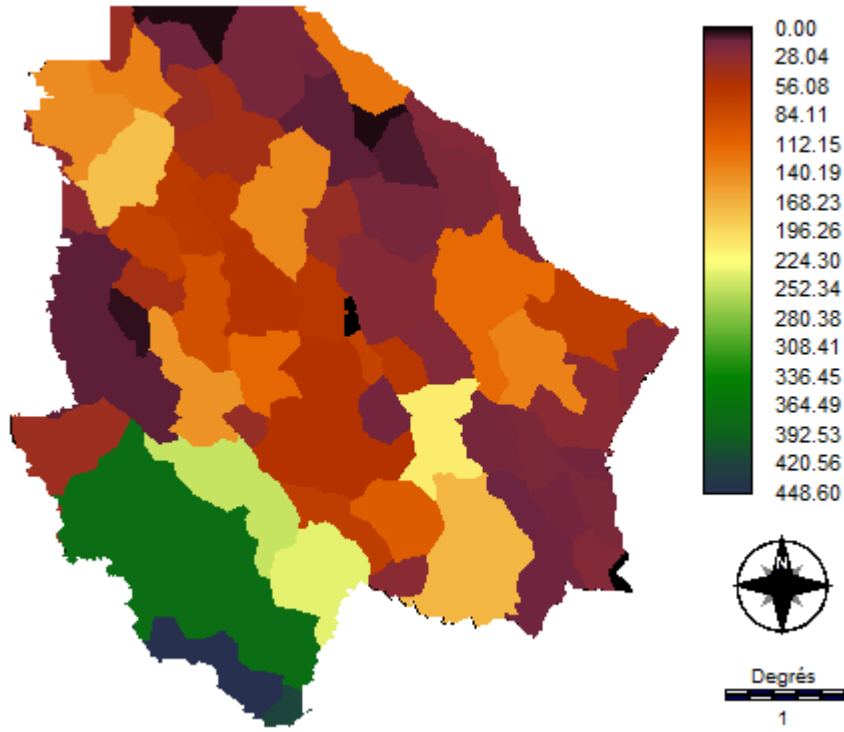
En accord avec ce qu'on pouvait attendre d'un territoire en majeure partie semi-désertique, les trois indicateurs de ressource montrent de fortes similitudes, illustrant une situation problématique associée aux quantités d'eau sur une large partie du territoire de chihuahua. Les cartes d'eau superficielle ( Carte 32) et souterraine (Carte 34) sont particulièrement semblables avec aptitudes respectivement inférieures à 0,20 et 0,23.



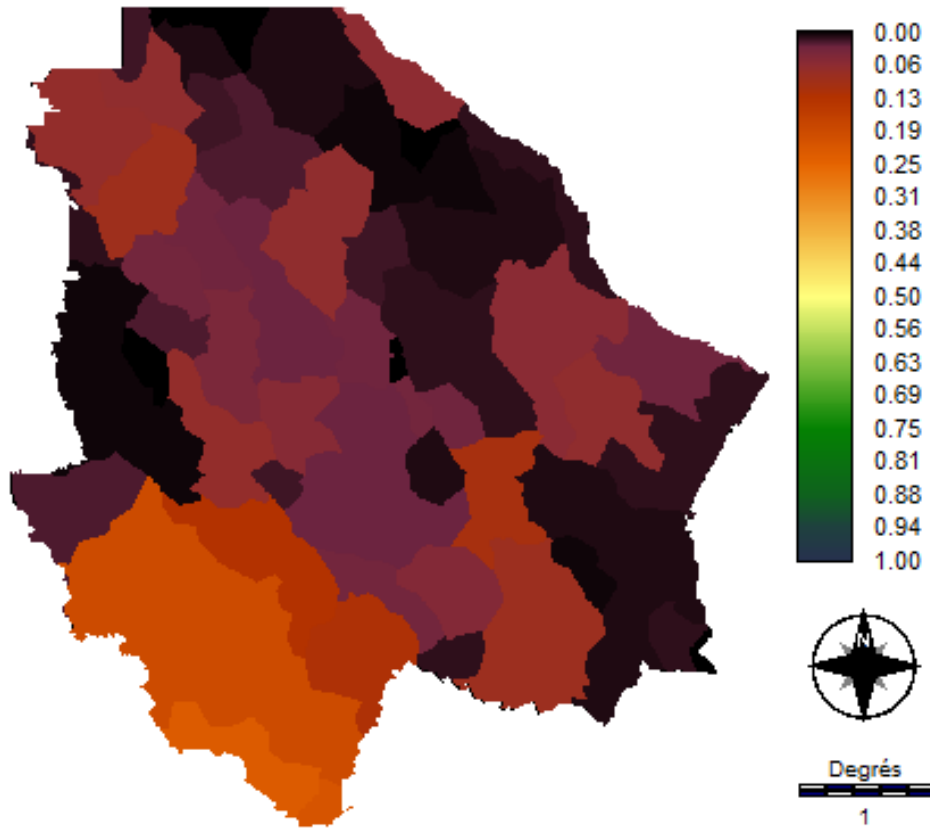
Carte 31 : Indicateur d'écoulement superficiel, R1



Carte 32 : Indicateur d'écoulement superficiel normalisé, R1

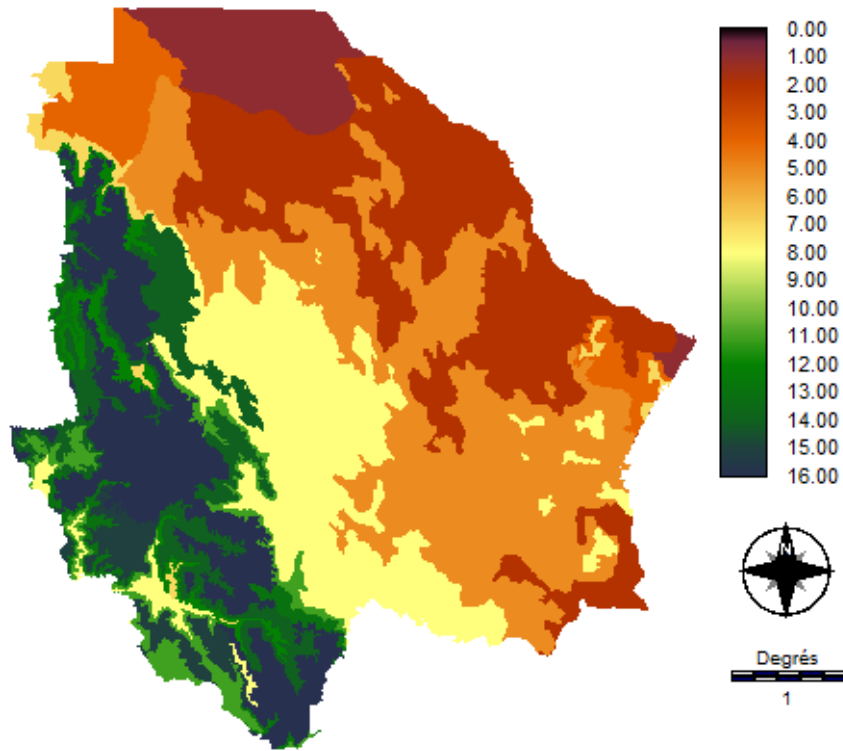


Carte 33 : Indicateur d'eau souterraine, R3

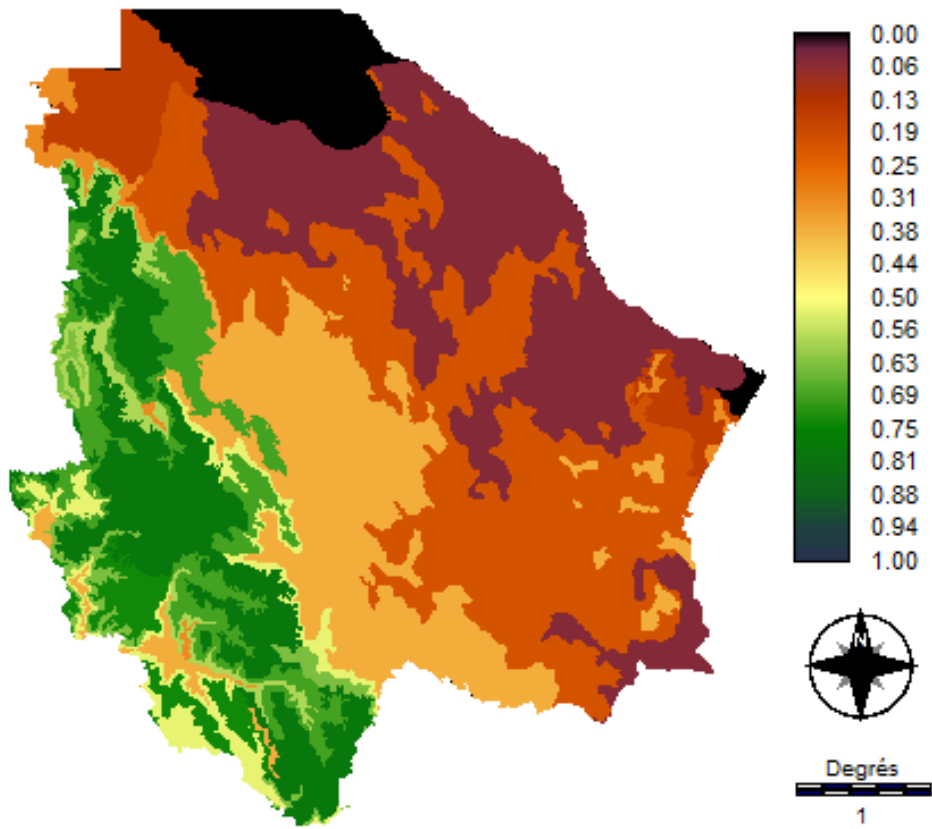


Carte 34 : Indicateur d'eau souterraine normalisé, R3

L'indicateur d'eau météorologique (Carte 36) indique également de fortes problématiques quantitatives dans les territoires désertiques qui regroupent des aptitudes inférieures à 0,20. Néanmoins il se distingue des deux autres en ce que les aptitudes de la Sierra sont comprises entre 0,35 et 0,79.



Carte 35 : Indicateur d'eau météorologique, R2



Carte 36 : Indicateur d'eau météorologique normalisé, R2

Il faut aussi préciser que les trois cartes font ressortir des problématiques quantitatives particulièrement fortes dans la région de Juárez. Mais malgré ces points communs les trois cartes comprennent quelques nuances. Ainsi, R1 ne fait pas de distinction dans le nord et l'est de l'Etat, à l'exception d'un couloir correspondant au Rio Conchos et qui arrive de fait jusqu'à Ojinaga. Au contraire, R2 ne distingue pas cette région : c'est dans le sud-est et dans le nord-ouest qu'il confère des aptitudes légèrement supérieures aux moyennes régionales. R3 pour sa part reflète les trois exceptions susmentionnées, mais les formes qu'elles prennent impliquent quelques variations. Il singularise le Rio Bravo par rapport au reste du désert comme dans R1, mais ce cours d'eau impact des territoires plus larges dans ce cas. Et si dans le nord-ouest les limites de R3 coïncident avec celle de R2, dans le sud-est elles correspondent au corridor du DR 005 de Delicias alors que ce n'était pas le cas pour R2. De plus, les indicateurs associés aux eaux souterraines (R3) et de climat (R2) insistent sur quelques territoires situés dans l'ouest aride de l'Etat. Et pour finir, R1 et R3 attirent l'attention sur la région de Moris dans la Sierra, alors que R2 ne signale que la particularité des canyons dans ce territoire.

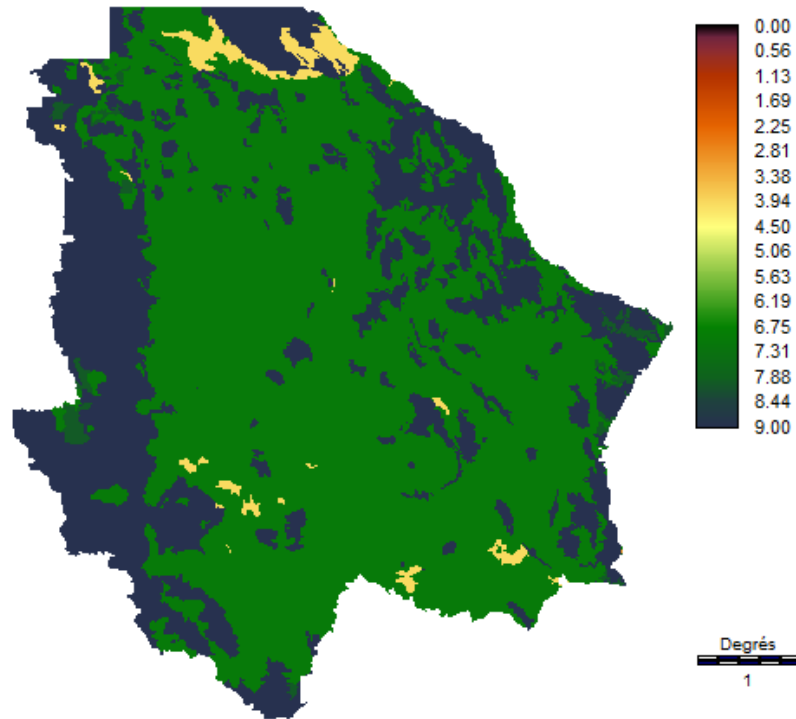
- Indicateurs d'environnement

Dans la composante d'environnement deux ensembles d'indicateurs se différencient du point de vue théorique mais aussi dans la forme que prennent les résultats. Ainsi, tandis que les indicateurs de préservation environnementale (M1, M2 et M3) génèrent majoritairement des aptitudes élevées, ceux de qualité de l'eau (Q1, Q2 et Q3) génèrent des aptitudes majoritairement inférieures à 0,50 sur tout le territoire. En outre, les indicateurs de préservation environnementale adoptent des formes aléatoires associées aux diverses configurations écosystémiques, alors que les indicateurs de qualité apparaissent sous des formes municipales ou agricoles.

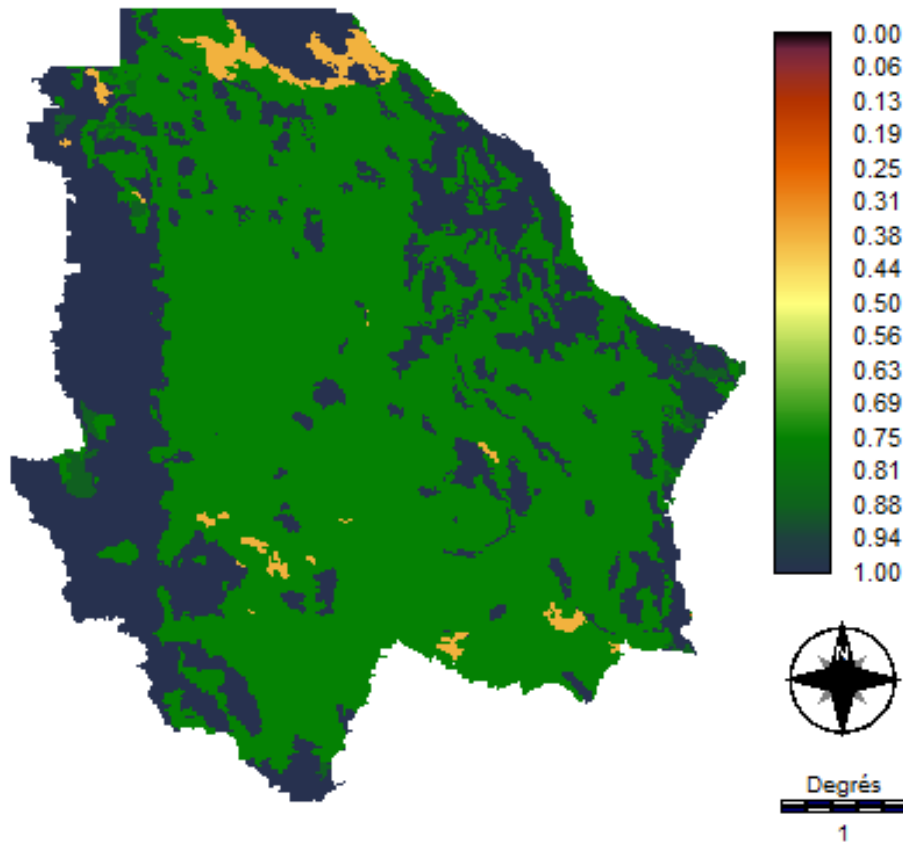
En l'occurrence, l'indicateur d'érosion (Carte 38) donne à voir de fortes aptitudes allant de 0,50 à 1. La majeure partie de l'Etat de Chihuahua se caractérise par un score de 0,75, et de vastes territoires atteignent même la valeur maximale, dans la Sierra notamment, et plus généralement en bordure de l'Etat. Les aptitudes les plus basses, qui correspondent à la moyenne sont ainsi concentrées sur des espaces localisés, qui correspondent à des écosystèmes particuliers. Le plus vaste et d'ailleurs le plus

connu d'entre eux correspond au désert de Samalayuca situé dans le nord de l'Etat à quelques kilomètres à peine de Ciudad Juárez et de la frontière.





Carte 37 : Indicateur d'érosion des sols, M1

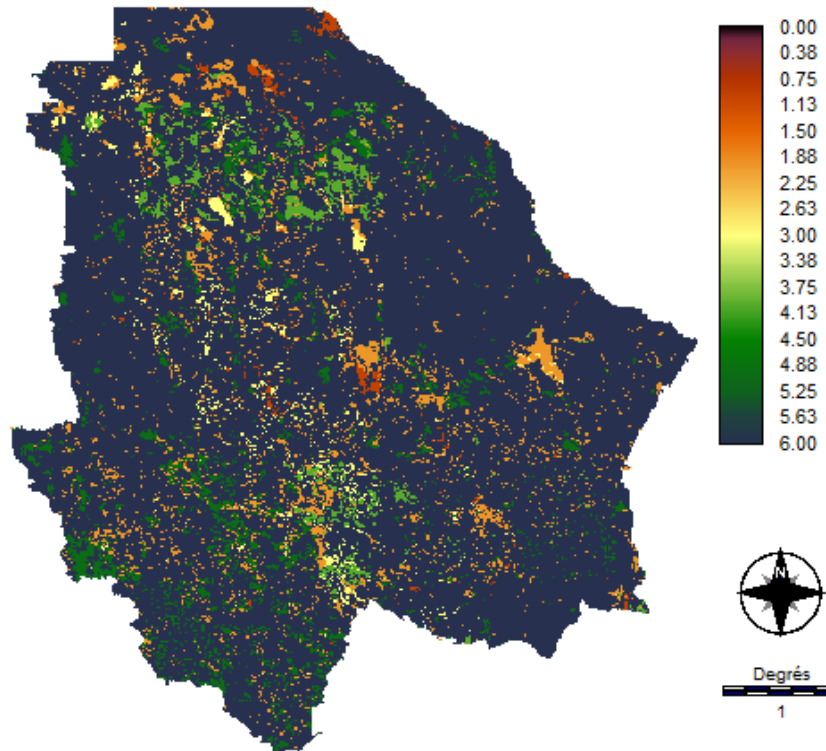


Carte 38 : Indicateur d'érosion des sols normalisé, M1

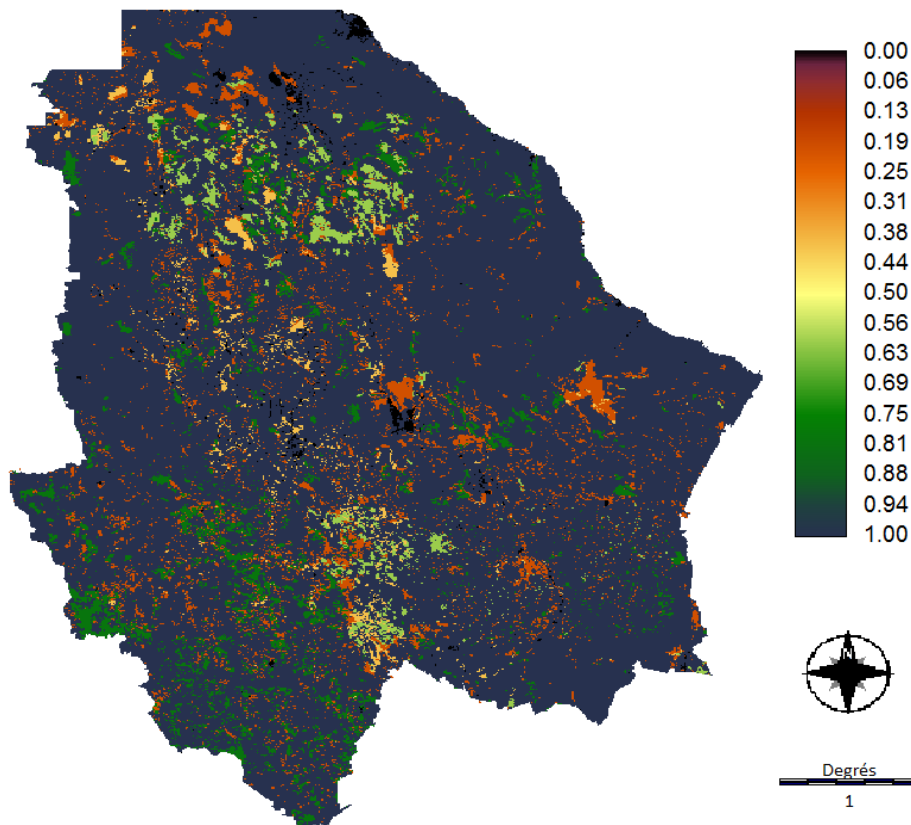
Contrairement à ce panorama relativement univoque, les indicateurs de dégradation de la couverture arborée (Carte 40) et de surexploitation (Carte 42) des aquifères sont caractérisés par un éventail d'aptitude allant de 0 à 1. Le premier indique que l'Etat de Chihuahua a connu divers phénomènes d'anthropisation entre 1997 et 2012. L'élevage et l'agriculture gagnent ainsi du terrain sur la forêt et les *matorrales*<sup>175</sup> naturels, les aires correspondant à ces déforestations étant signalées par des aptitudes de 0,20 (en rouge) sur la carte. En particulier la création d'aires agricoles est notable dans le sud d'Ojinaga ainsi qu'au nord de la capitale de l'Etat (Chihuahua) et dans les municipalités agricoles de Delicias, Jiménez et Camargo au sud de l'Etat, et d'Ascension dans le nord. Néanmoins, les activités d'agriculture et d'élevage s'étendent aussi – bien que plus ponctuellement – dans la Sierra, et dans le centre ouest de l'Etat. En parallèle, quelques territoires obtiennent une aptitude de 0,40 (en beige sur la carte). Initialement dédiés à l'élevage, ils sont devenus des espaces agricoles. Cependant cette dynamique reste ponctuelle et concentrée dans les corridors de développement du centre de l'Etat. Enfin, deux tendances à l'intensification de l'élevage sont révélées par des aptitudes de 0,60 (en vert clair sur la carte). Elles se concentrent respectivement dans le nord de l'Etat ainsi que dans le sud.

---

<sup>175</sup> « végétations arbustives associées à un climat sec »



**Carte 39 : Indicateur de dégradation de la couverture arborée, M2**

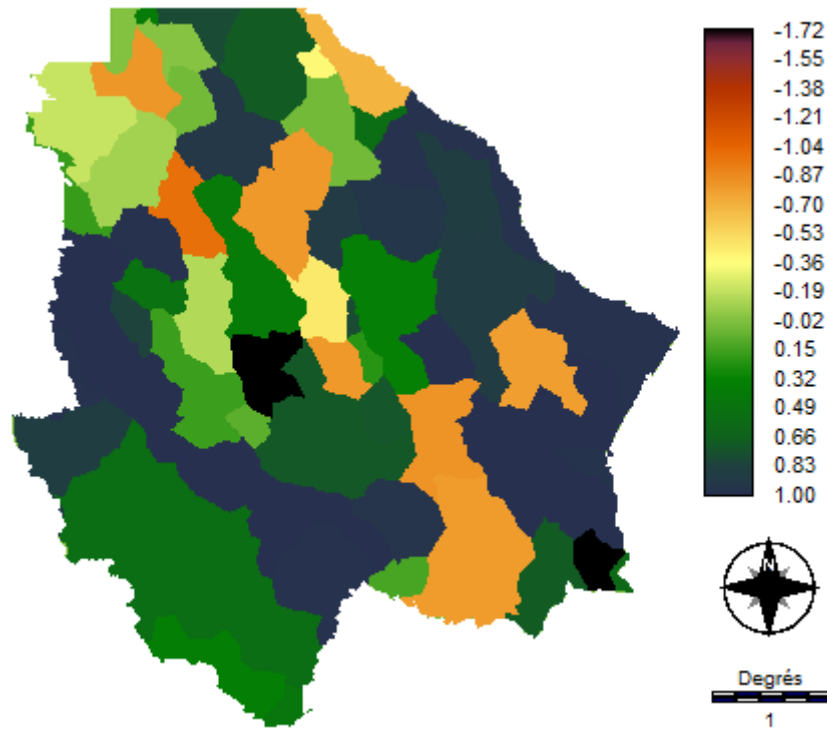


**Carte 40 : Indicateur de dégradation de la couverture arborée normalisé, M2**

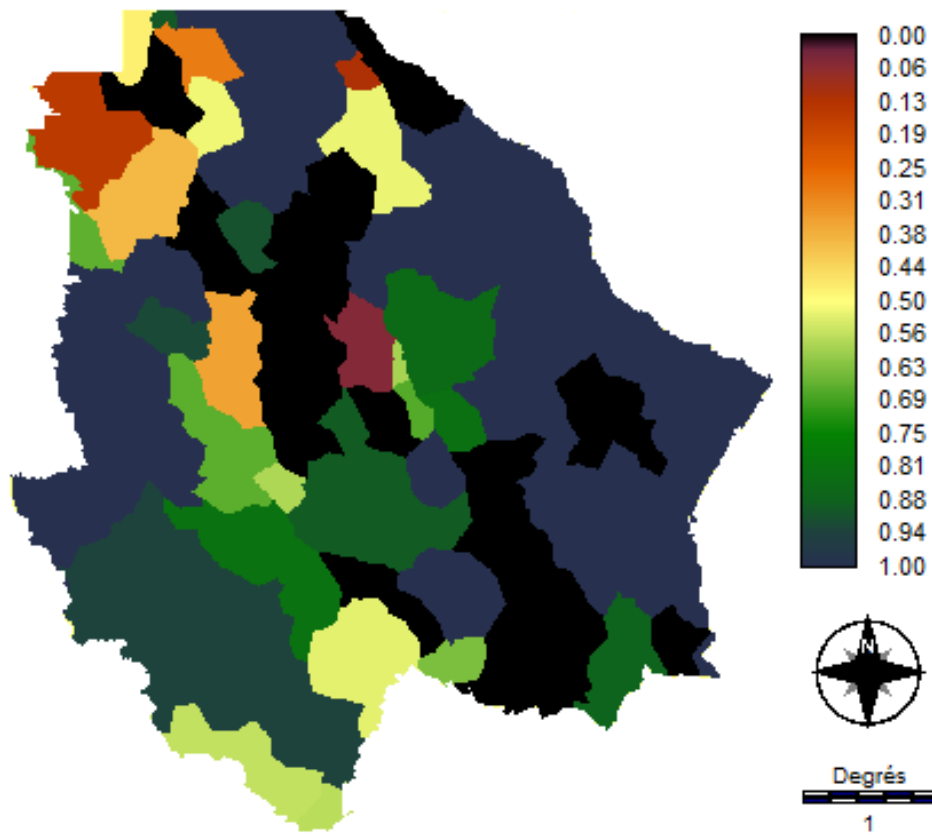
Sous ces formes variées l'anthropisation affecte en somme l'ensemble du territoire considéré. Elle explique d'ailleurs aussi les aptitudes de 0,80 représentant (en vert foncé) les dégradations des végétations primaires dans la Sierra et en périphérie des pôles d'activités reconnus dans l'Etat. Dans ce contexte le cœur du désert et une partie de l'ouest de l'Etat sont relativement épargnés. Enfin, la région correspondant à Cuauhtémoc recense quantitativement moins de transformation de la couverture végétale que les autres pôles inclus dans le territoire.

En ce qui concerne l'indicateur de surexploitation des aquifères (M3), il convient de rappeler qu'il a été adapté à partir de la méthodologie mexicaine traditionnelle (Section 2.3.3). La surexploitation est notamment maximale autour des territoires agricoles, à savoir Delicias, Ojinaga, Cuauhtémoc, Chihuahua et Juárez, Jiménez. Des aptitudes particulièrement basses (entre 0 et 0,51) confirment cette corrélation en attirant aussi l'attention sur le nord et le nord-ouest de l'Etat. Le reste du territoire est pour sa part caractérisé par des aptitudes allant de 0,5 à 1, en étant majoritairement supérieures à 0,60.

Ce faisant, la carte fait apparaître négativement les corridors de développement comme avec la méthode de calcul classique (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a). Mais comparativement aux méthodes traditionnelles, elle a aussi l'avantage de signaler l'impact peu prononcé des activités minières dans le sud de la sierra. De plus, elle permet d'identifier des exploitations plus ou moins inquiétantes en périphérie des aquifères les plus problématiques. Tout en attirant l'attention sur les situations extrêmes, les résultats donnent à voir que l'exploitation des eaux souterraines existe aussi de manière intensive et extensive, précisant ainsi le diagnostic, et favorisant aussi le suivi d'une problématique importante. La Carte 42 attribue de fortes aptitudes aux déserts, cela confirme en un sens leur aspect de désert humain.

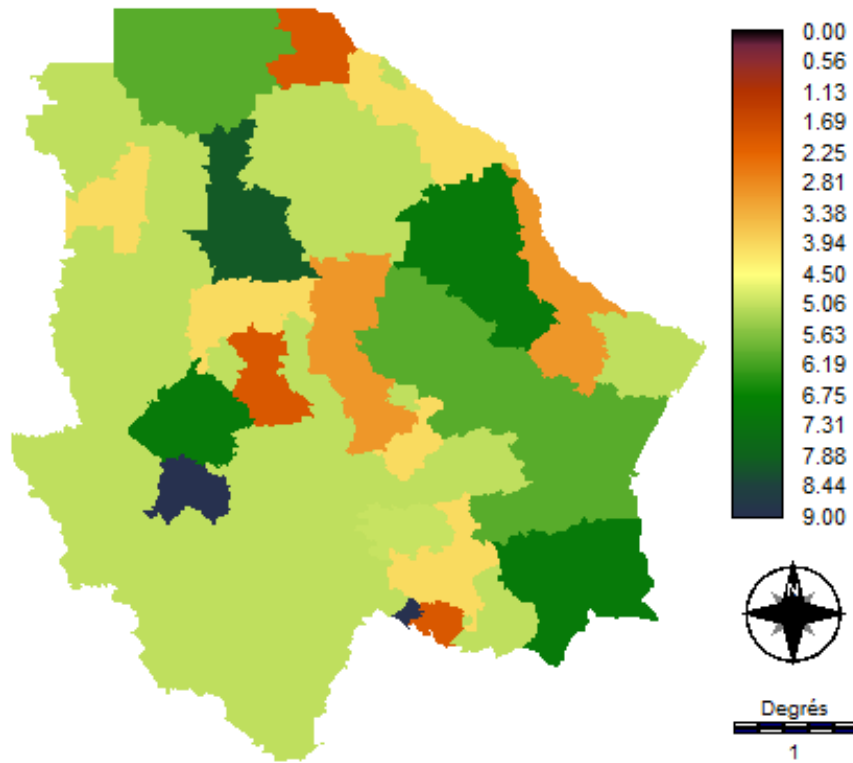


Carte 41 : Indicateur de surexploitation des aquifères, M3

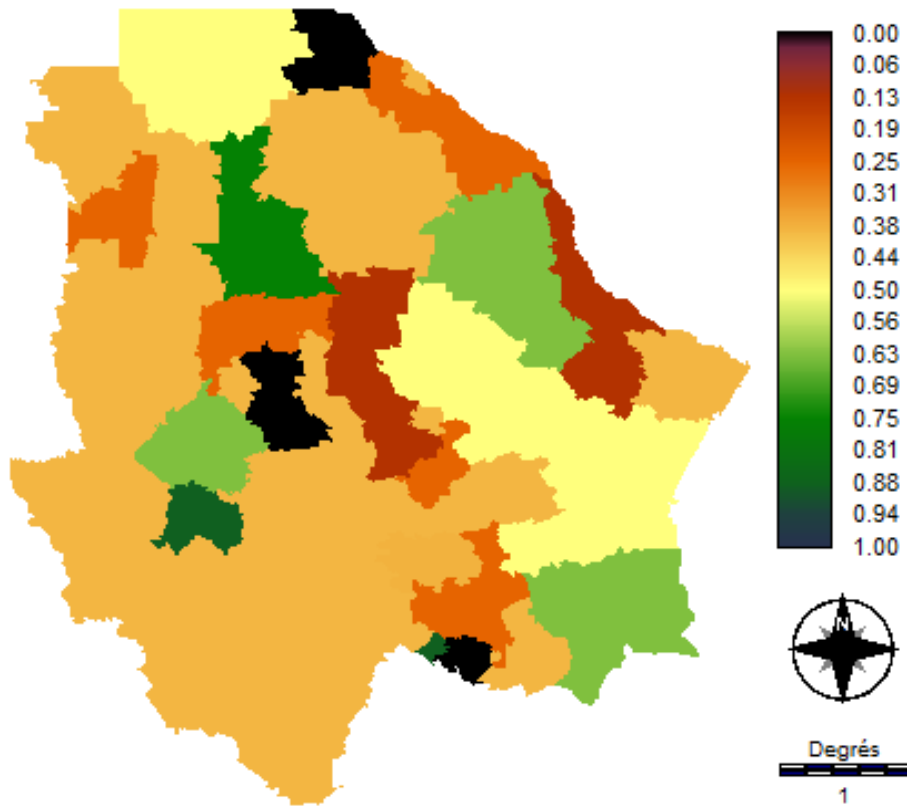


Carte 42 : Indicateur de surexploitation des aquifères normalisés, M3

Dans le cas des trois indicateurs de qualité, aucun territoire n'atteint l'aptitude maximale. En outre, les cartes de Q1 et Q2 attirent l'attention sur le manque de données (Carte 44 et 29). Les scores engendrés pour Q1 donnent à voir que le suivi de la qualité chimique de l'eau est plus systématique dans le nord et l'est de l'Etat que dans l'ouest et dans le sud. Faute de données, les municipalités correspondantes ont ainsi reçu un score correspondant à la moyenne observable dans l'Etat, équivalent à une aptitude de 0,38. Il faut noter à ce sujet que l'ensemble de la Sierra est resté sans donnée, ce qui fait écho à la marginalité signalée par les indicateurs de capacité et d'accès.



Carte 43 : Indicateur de qualité chimique de l'eau, Q1

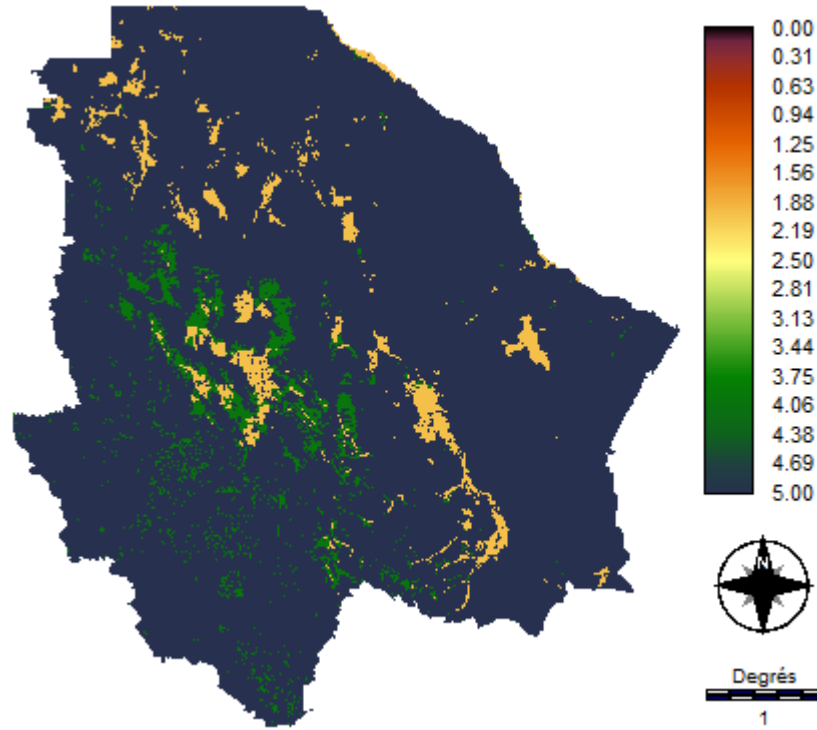


Carte 44 : Indicateur de qualité chimique de l'eau normalisé, Q1

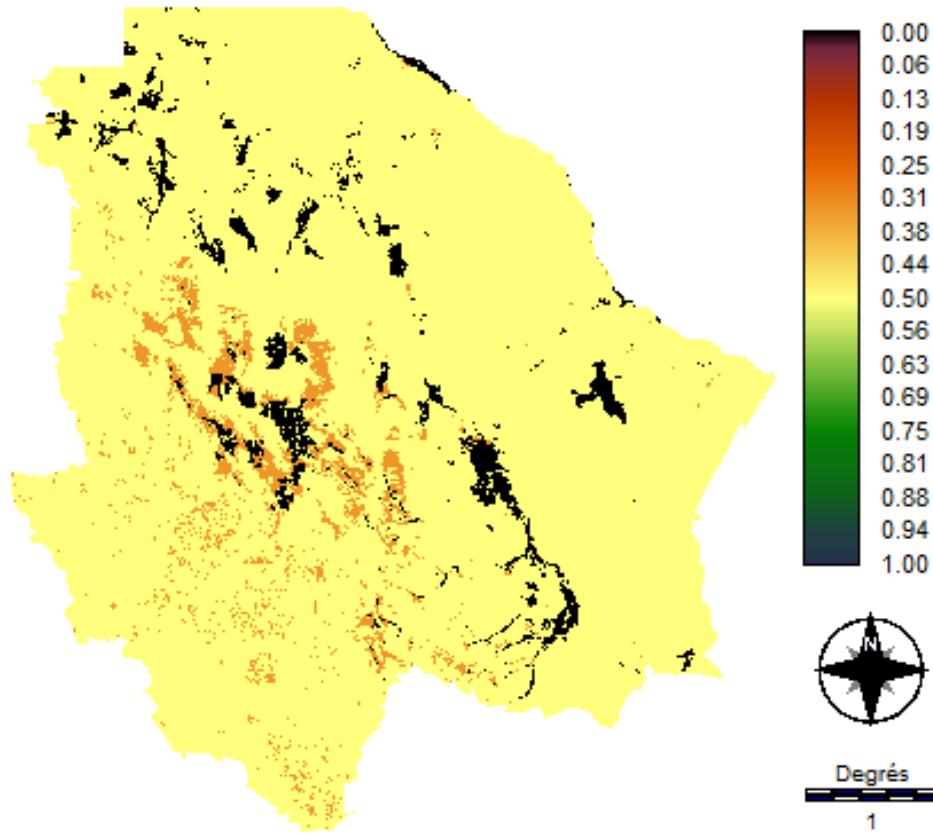
Dans ce contexte, la Carte 44 indique des tendances relativement marquées. Les pôles de développement que sont Ojinaga, Juárez, Cuauhtémoc, Chihuahua, Delicias, Parral ou certaines municipalités qui leur sont voisines obtiennent les aptitudes les plus basses. Seule Jiménez fait exception dans ce cadre avec une aptitude de 0,62. Au contraire, des aptitudes supérieures ou égales à la moyenne (0,5) sont notables à Coyame del Sotol et au sud de cette municipalité, ainsi qu'à Ascensión (municipalité voisine de Juárez) et au sud de celle-ci. Reste ensuite trois autres exceptions avec de hautes aptitudes, situées à l'ouest de Cuauhtémoc et au sud de Parral.

L'indicateur de contamination agricole (Q2) est pour sa part bien moins surprenant. Il convient de rappeler à ce stade que des aptitudes moyennes ont été sciemment octroyées aux espaces non-agricoles, pour lesquels la thématique des intrants agricoles n'est pas pertinente. En outre, Q2 attribue l'aptitude minimale aux surfaces irriguées et une aptitude de 0,33 aux surfaces d'agriculture temporaire. Ces scores attirent essentiellement l'attention sur cette problématique importante et sur le manque de données correspondantes.



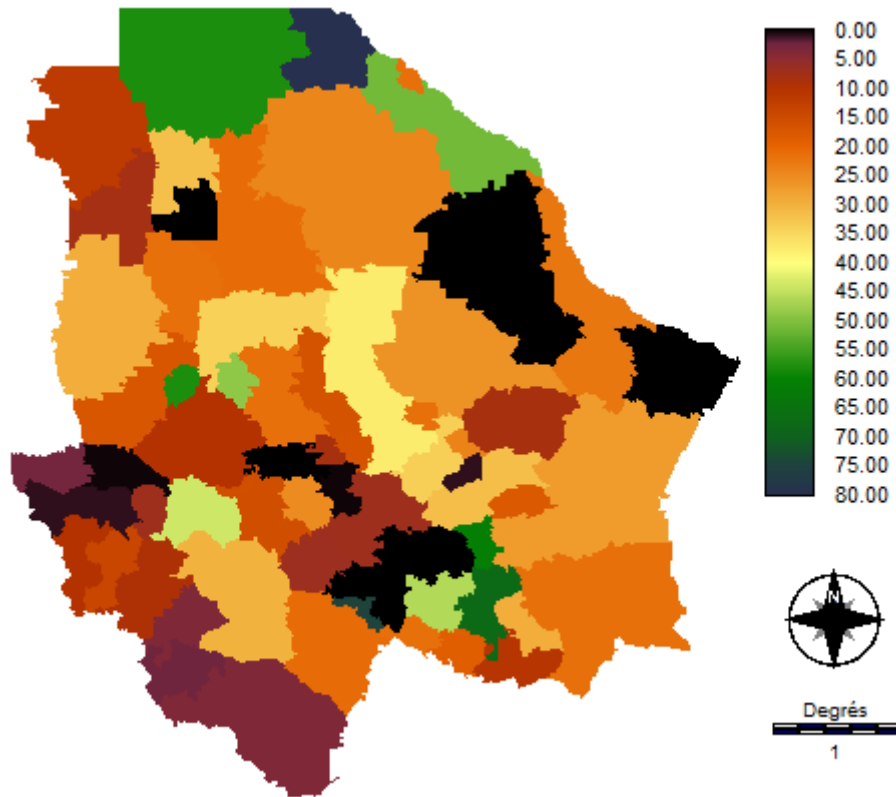


Carte 45 : Indicateur de contamination agricole de la ressource, Q2

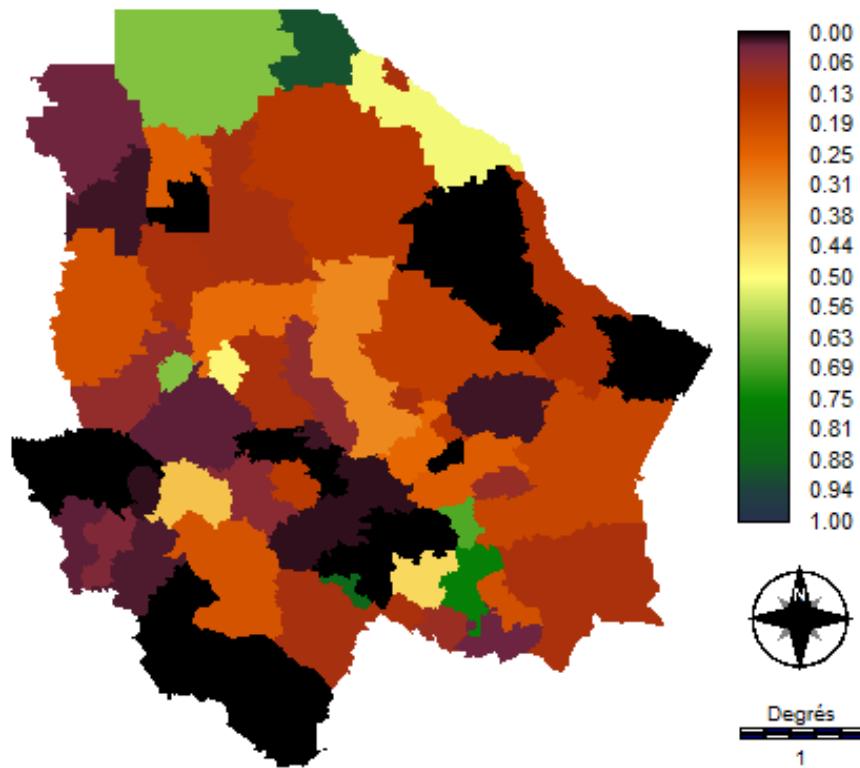


Carte 46 : Indicateur de contamination agricole de la ressource normalisé, Q2

Enfin, en ce qui concerne le traitement de l'eau (Q2) la situation de l'état est globalement peu apte, avec des aptitudes majoritairement inférieures à 0,31. Parmi l'ensemble des territoires concernés par ces faibles aptitudes, la Sierra obtient des scores plus faibles que le reste du territoire. De plus, les municipalités avec des aptitudes nulles correspondent en grande partie aux municipalités qui n'ont pas de ville (de plus de 2 500 habitants) à savoir : Galaena, Coyame del Sotol, Manuel Benavides, Moris et le sud de la Sierra. Quelques municipalités font exception en obtenant des scores supérieurs à la moyenne et allant jusqu'à 0,90. Il s'agit de Juárez et Parral (ainsi que quelques municipalités qui leur sont limitrophes), mais aussi de Matachí et Bachíniva.



Carte 47 : Indicateur de traitement de l'eau résiduelle, Q3



Carte 48 : Indicateur de traitement de l'eau résiduelle normalisé, Q3

En conclusion, pour les indicateurs M2, M3 et Q2 les corridors de développement concentrent de plus fortes problématiques. Mais il convient de remarquer que la normalisation de Q3 engendre une hiérarchie semblable à celle des indicateurs de capacité et d'accès, qui insiste sur la marginalisation de la Sierra. Cela porte à réfléchir sur la place du développement dans le WPI (Section 3.2.3).

### 3.1.3 *Discussions : les indicateurs construits et normalisés pour élaborés l'IPE-SIG*

Afin de nourrir les discussions concernant la sélection des indicateurs et l'interdisciplinarité de l'indice l'IPE-SIG a été construit à partir de deux ensembles. Ainsi, les indicateurs de ressource et d'environnement ont été élaborés en utilisant préférentiellement des données cartographiques et des échelles spécifiques (Sections 2.3.2 et 2.3.3). Les indicateurs socio-économiques sont pour leur part construits en adaptant les indicateurs traditionnels en fonction de la disponibilité des données (Section 2.3.1). L'analyse des cartes d'indicateurs normalisés permet d'interroger les choix de construction adoptés. En parallèle, ils interrogent aussi l'opération de normalisation en elle-même, laquelle est d'ailleurs singulière dans le cadre du calcul de l'IPE-SIG (Sections 1.4.2 et 2.4.1).

- Forces et faiblesses des cartes d'indicateurs employées pour le calcul de l'IPE-SIG

L'analyse des bases de données permet de construire 19 indicateurs pour le calcul de l'IPE-SIG. En outre, elle permet d'élaborer la majorité des indicateurs inclus dans les composantes de ressource et d'environnement, en utilisant des approches hydrologiques et environnementales. Ainsi, l'ensemble des indicateurs de ressource (R1, R2, R3) et de préservation environnementale (M1, M2, M3) ont-ils pu être construits à partir de bases de données cartographiques spécifiques. Quatre d'entre eux (R1, R2, M1, M2) prennent directement la forme de carte ou d'analyse cartographiques, tandis que les deux autres (R3 et M3, relatifs aux aquifères) ont pu être digitalisé et traités sans problème majeur (Section 2.3.2 et 2.3.3). Ces indicateurs dressent un état des lieux, notamment de la situation hydrologique et environnementale : les cartes qu'ils tracent les distinguent fortement des autres indicateurs de l'IPE-SIG. Cela constitue une force pour l'interdisciplinarité de l'indice, comme le confirment l'analyse des résultats de l'IPE ainsi que leur discussion (Section 3.2).

Cependant, des limites affectent le corpus d'indicateurs. En ce qui concerne la composante de ressource :

- ✓ l'échelle de l'indicateur d'écoulement superficielle (R1) pourrait être plus fine, et de ce fait, plus précise ;
- ✓ la recharge des aquifères employées pour R3 n'est pas mesurée mais construite, notamment à partir de données d'écoulements superficiels (cela génère une corrélation entre R1 et R3 qui est néfaste dans le cadre de l'IPE (Garriga et Foguet, 2010a)).

En outre, les indicateurs de qualité de l'eau n'ont pas pu être construits à partir de données et d'échelles les plus adaptées. Ainsi, deux des trois types de données de qualité valorisés dans la composante d'environnement (Q1 et Q3) sont d'ordre statistique, et le troisième indicateur (Q2) est quant à lui élaboré de manière indirecte (Section 2.3.3). L'objectif fixé concernant les indicateurs hydrologiques et environnementaux n'est donc qu'en partie atteint. Pour remédier à ce problème l'indicateur de traitement des eaux résiduelles pourrait bien sûr être exclu de la composante d'environnement : soit en excluant l'indicateur de l'IPE soit en le déplaçant dans une autre composante (accès par exemple). Mais par-delà la spécificité de la construction des indicateurs, c'est bien la collaboration indirecte science/société à travers l'utilisation des données publiques dans le calcul de l'IPE qui est interrogée dans la présente étude (Section 1.4). Dans ce cadre, l'utilisation de données hydrologiques et environnementales, loin de constituer une contrainte méthodologique stricte est un outil de discussion. En l'occurrence, il est remarquable qu'elle ouvre des perspectives cartographiques intéressantes en ce qui concerne l'élaboration d'indicateurs de préservation environnementale au Mexique. Dans le même temps, elle questionne aussi les indicateurs de ressources d'eau souterraine et de qualité de l'eau : à travers eux, elle soulève la question des données.

De fait, l'accès aux données a été en lui-même un sujet de discussion pour les concepteurs de l'IPE ; sujet qui a ensuite été mis de côté même s'il reste important (Anju et al., 2017 ; Lawrence et al., 2003 ; Sullivan et Meigh, 2005). Comme le proposent Lawrence et al. (2003) la stratégie la plus fréquemment adoptée est de travailler avec les données disponibles et à supprimer les indicateurs, lorsqu'elles ne le sont pas. Cependant dans cette perspective, les manques de données réduisent les possibilités de discussions concernant l'IPE mais aussi concernant les indicateurs en eux-mêmes (Section 1.3.2 et 1.3.3). Or Sullivan et al. (2003), au contraire, recommandent de négocier la collecte des données avec

les autorités. Cette perspective est particulièrement intéressante au Mexique, où les problèmes de données posent de nombreuses questions (Section 2.2.3). De fait, ces problèmes affectent autant les indicateurs hydrologiques et environnementaux que les indicateurs socio-économiques. Il faut ainsi rappeler que la pertinence de l'indicateur d'accès à l'irrigation (A1) est limitée par le fait que les données collectées sont publiées par unité de production et non par hectare (Section 2.2.1). Plus encore, les PIB municipaux (par habitant et par type d'activité) n'étant pas disponibles, les indicateurs qui l'incluent traditionnellement (C1, U2 et U3) ont été construits à partir de données de substitution (Section 2.2.1). En discutant ces points, des lignes directrices peuvent être clairement définies, ce qui favorise la négociation avec les autorités concernées par la collecte (Mlote et al., 2002 ; Sullivan et al., 2003). Ainsi, l'inclusion des indicateurs de qualité malgré leurs limites permet d'attirer l'attention sur ces thématiques importantes (UN-WWAP, 2015 ; United Nations, 2017), tandis que leur suppression reviendrait à les mettre de côté.

L'identification précise des enjeux de calcul joue un rôle fondamental dans les nombreux choix de construction d'un indice, et notamment dans la définition de la focale analytique adoptées pour construire les indicateurs (Vollmer et al., 2016). Dans le cadre de la présente réflexion sur la construction interdisciplinaire de l'IPE en collaboration indirecte avec les autorités publiques, l'association de bases de données statistiques et cartographiques constitue une alternative intéressante. Mais cette stratégie va de pair avec une réflexion concernant l'étape de normalisation, car la méthode employée doit intégrer différents types d'indicateurs.

- Cartographie et normalisation « *FUZZY* » : discussion des seuils adoptés pour construire les cartes d'indicateurs

La méthode statistique traditionnelle de calcul de l'IPE présente des limites, parmi lesquelles figure le fait qu'elle ne permet pas de normaliser les indicateurs cartographiques de manière satisfaisante (Sections 1.3.1). C'est pourquoi la normalisation min/max des indicateurs a été remplacée par la technique « *FUZZY* » issue de l'EMC (Section 1.4.2). Celle-ci a l'avantage d'être applicable autant à des données statistiques qu'à des données cartographiques, comme le confirment les cartes d'indicateurs illustrées ci-dessus. Cependant, cette technique de standardisation impose de définir des seuils

d'aptitudes<sup>176</sup>. Les maximales et minimales des séries de données peuvent être employées à cette fin, néanmoins le choix a été fait de favoriser les possibilités de comparaisons, ainsi que la précision des seuils afin d'encourager les débats correspondant (Section 1.3.1). Pour certains indicateurs, construits de manière classique, la littérature spécialisée discute des seuils intéressants. En revanche pour d'autres indicateurs, moins classiques, leur définition soulève plus de questions.

Douze indicateurs (A1, A2, A3, C1b, C2, C3, M1, M2, M3, Q3, R2, et U1) sont construits de manière relativement classique. Parmi eux, six comptent sur des méthodes standardisées mondialement :

- ✓ A2, A3 et Q3 qui prennent la forme de pourcentages ;
- ✓ C1b, C2 et C3 dont les seuils sont extraits de la Banque Mondiale (2013, 2016) et des UN (2011).

A ce sujet, une limite est notable à l'égard de l'indicateur C1b. En effet, les données employées par les autorités mexicaines pour construire le coefficient de Gini ne correspondent pas exactement à celles de la Banque Mondiale : l'une emploie l'ICTPC et l'autre le PIB par habitant (les différences existant entre ces données sont détaillées dans la section 2.3.1). Le coefficient étant construit comme un rapport, l'équivalence des deux a néanmoins été assumée, en sachant qu'elle peut ne pas être exacte. En l'occurrence, les comparaisons de la carte obtenue pour cet indicateur avec celles des autres indicateurs de capacité ainsi qu'avec la littérature spécialisée tendent à valider cette démarche (Meza Moreno, 2012), qui constitue malgré tout un point discutable de la méthode adoptée. Avec cette limite, la normalisation des six indicateurs mentionnés présente l'avantage d'être réutilisable à travers le monde.

Les six autres indicateurs (A1, M1, M2, M3, R2 et Q3) sont, pour leur part, normalisés à partir de seuils émergents de consensus moins vastes que les précédents, mais néanmoins réels et réutilisables partout autour du globe. Ainsi, les seuils retenus pour R2 sont-ils directement adaptés<sup>177</sup> d'une étude considérée comme une référence climatologique à travers le monde, à savoir : le système de classification climatique de Köppen (Section 2.3.2). Des modifications ont été appliquées par Garcia (2004) à l'étude

---

<sup>176</sup> A cela, vient s'ajouter le choix des relations d'aptitudes définissant le type de courbe d'appartenance employée pour les calculs FUZZY (Section 1.4.2). Dans le cas présent, la relation linéaire n'a été remplacée que dans le cas des indicateurs A2, A3 et Q3 qui sont construits sous la forme de pourcentages (Section 2.4.1). La discussion de ce point étant restreinte, par le choix de la simplicité comme par le manque d'antécédents, elle n'est pas développée ici même si elle pourrait devenir intéressante pour de futur calcul d'IPE-SIG.

originale pour faire ressortir certaines spécificités climatiques mexicaines. Cependant, la proposition de García (2004) reste significativement proche de la classification de Köppen, et les réadaptations éventuellement nécessaires pour re-mondialiser les seuils consistent davantage en des ajustements ou des révisions qu'en opérant des transformations radicales. Le cas de l'indicateur d'usage public (U1) est assez similaire à celui de R2. En effet, les seuils sont adaptés à partir d'une référence en la matière, à savoir : l'étude de l'OMS menée par Howard et Bartram (2003). De fait, les seuils habituellement retenus pour le calcul de l'IPE ne s'avèrent pas pertinents pour traiter les conditions mexicaines (Jemmali et Matoussi, 2012 ; Manandhar et al., 2012). Ceux-ci ont donc été sélectionnés et complétés de manière à tenir compte de cette singularité mexicaine (Section 2.4.1). Les seuils qui ont ainsi été adoptés sont réutilisables et pertinents puisque, tout en s'inscrivant dans la continuité des études mondiales, ils ont généré des résultats divers à Chihuahua.

Le cas de l'indicateur A1 (accès à l'irrigation), et des indicateurs de préservation environnementale (M1, M2, M3) est différent car aucune référence ne s'impose aussi clairement au sein de la littérature spécialisée. Dans ce contexte, les seuils concernant A1, M1 et M2 sont directement extraits d'études spécialisées concernant ces problématiques (Chabrilat, 2015 ; Frenken, 2005 ; Nuñez, et al., 2015 ; Parry, et al., 2007 ; SEMARNAT, 2004). De ce fait, si d'autres seuils étaient employés pour les normaliser, les adaptations induites par ces alternatives représenteraient des ajustements plus que des transformations radicales. Enfin, dans le cas de M3 (indicateur de surexploitation des aquifères) la méthodologie a été adaptée à partir de la méthodologie de diagnostic mexicaine (Estados Unidos Mexicanos, 2000) : dont l'avantage est le classicisme mais les principaux inconvénients sont la simplicité et la dualité (Omar, 2015) (Section 2.3.3). Les constructions de l'indicateur et des seuils ont donc été adaptées pour étendre et préciser le diagnostic. Tout en attirant l'attention sur les situations problématiques mises en évidence avec la méthode de calcul mexicaine classique (SEMARNAT-CONAGUA, 2015a), les résultats déterminent différentes situations, d'exploitations extensives et intensives des ressources souterraines. A ce titre, elle permet donc d'affiner le diagnostic et d'envisager un suivi plus précis de cette problématique sur l'ensemble du territoire. Cette perspective de suivi constitue un avantage non négligeable dans le cadre de l'IPE, même si elle reste limitée à ce jour par de fortes carences associées à la disponibilité des données (Sections 1.3.2 et 2.2.3). En somme, même s'ils restent discutables, les seuils employés pour les quatre indicateurs indiqués peuvent être utilisés ou adaptés partout à travers le monde.



Comparativement à ces divers consensus, la normalisation des sept autres indicateurs (C1, Q1, Q2, R1, R3, U2, U3) soulève des questions plus critiques, car la construction des indicateurs en eux-mêmes est singulière. En l'occurrence, l'indicateur de contamination agricole de l'eau (Q2) est normalisé à partir d'études spécialisées (Babut et al., 2013 ; Legarreta et al., 2002), comme dans les cas précédents. Les seuils employés sont en théorie ré-exploitable, mais l'indicateur ayant été construit de toute pièce la pertinence des seuils ne peut être légitimement discutée ici. En ce qui concerne Q1 (ICA), il en est presque de même, puisque les données mexicaines ont été adaptées de manière à rendre l'indicateur sensible à des considérations quantitatives sur les données. C'est ce qui empêche de discuter les seuils « *FUZZY* ». La construction des cinq autres indicateurs (R1, R3 C1, U2 et U3) sont également singulières (Section 2.3). C'est pourquoi leur normalisation est opérée en employant les maxima et minima mexicains (Section 2.4.1) qui ont l'inconvénient de ne pas être réutilisables (pour le moins tels quels).

En ce qui concerne les deux indicateurs hydrologiques (R1 et R3), il faut néanmoins signaler que le Mexique est caractérisé par un grand éventail de valeurs en ce qui concerne les quantités d'eau superficielles et les recharges d'eaux souterraines, permettant de caractériser des territoires particulièrement divers (cf. introduction). Dès lors, même s'ils méritent sans doute d'être encore précisés et discutés puisqu'ils sont issus d'analyses réalisées dans le seul territoire mexicain, les seuils employés constituent une base intéressante dans la perspective de fixer les seuils d'aptitudes. En outre, les seuils de normalisation de l'indicateur Q1 étant construits à partir de la littérature spécialisée, ils peuvent entrer dans le cadre des discussions concernant l'uniformisation de la méthode. En somme, seuls les seuils de Q2, C1, U2 et U3 ne sont pas en aucune mesure réutilisables dans le cadre de calculs régionaux de l'IPE réalisés en dehors du Mexique. Pour les autres indicateurs, les alternatives adoptées peuvent entrer dans le cadre des discussions concernant l'uniformisation des seuils. Dans un contexte où les débats sont à peine amorcés (Maheswari et al., 2017 ; Manandhar et al., 2012), c'est une des forces de cette étude que d'étendre au maximum la pertinence et la réutilisation des seuils.

A ce stade, pour valider la première phase d'élaboration de l'IPE, il reste finalement à discuter la cohérence des cartes « *FUZZY* » obtenues à l'issue de la phase de normalisation (OECD et JRC, 2008).

- Cohérence des indicateurs, et validation de la cartographie qu'ils génèrent

La technique « *FUZZY* » permet de normaliser les indicateurs de l'IPE de telle sorte qu'elle génère des panoramas qui sont tous échelonnés de manière adimensionnelle et uniforme. Sous cette forme, ils sont agrégés entre eux pour obtenir les cartes de composantes, lesquelles constituent des panoramas intermédiaires correspondant aux cinq dimensions de la pauvreté en eau : capacité, accès, usage, environnement et ressource. Ces deux corpus sont affectés par les limites qui ont été mentionnées en ce qui concerne les données et les seuils employés pour leur normalisation. Mais par-delà ces deux limites, il est intéressant de discuter la cohérence des cartographiques obtenues avec d'autres études concernant la région d'étude (OECD et JRC, 2008).

Les possibilités de discussions sont limitées par le fait que peu d'études s'intéressent à l'ensemble de l'Etat de Chihuahua en associant ces caractéristiques de géographie physique et humaine (cf introduction). La diversité socio-économique apparaît surtout à travers le constat de la marginalisation de la Sierra, par opposition au développement des régions que sont Cuauhtémoc, Chihuahua, Delicias, Juárez et Parral (Arreguin et al., 2015 ; Meza, 2012). D'autres études portent quant à elles sur la gestion de l'eau dans les régions développées (Enrique et al., 2014 ; Ernesto et Gómez, 2007 ; Jiménez González, 2004 ; Olvera-salgado, et al. 2014), mais peu d'analyses concernent la marginalisation des territoires désertiques (Quintana, 2009). Une large littérature scientifique s'intéresse en revanche aux problématiques hydrologiques et environnementales (Hernandez Garcia, 2007 ; Nuñez et al., 2015 ; Peña et Fuentes, 2007 ; Reyes-Gómez, 2006)<sup>178</sup>. Néanmoins, elles reposent essentiellement sur des données de terrain qui sont, elles aussi, collectées localement. Ainsi, l'étude de Nuñez et al. 2015 se démarque par son approche cartographique, même si son intérêt reste réduit par le fait qu'elle s'intéresse exclusivement aux milieux désertiques. Dès lors, les rapports des organismes publics ainsi que les quelques études qui mettent en relation les problématiques environnementales avec les pôles de développement font figures d'exceptions (CONAGUA, 2016a ; Olvera-salgado et al., 2014 ; Rivera, 2016). Dans ce contexte, la cohérence de la cartographie obtenue est commentée :

- ✓ en rapprochant les indicateurs entre eux,
- ✓ et au regard de la présentation du terrain d'étude (Section 2.1.1) et des analyses menées aux échelles locales.

---

<sup>178</sup> A ce sujet, l'Atlas de vulnérabilité pour sa part s'intéresse essentiellement à des approches et à des projections climatiques, qui ne sont que partiellement intégrées dans l'IPE, et ne disent rien des pôles de développement (Arreguin et al., 2015).

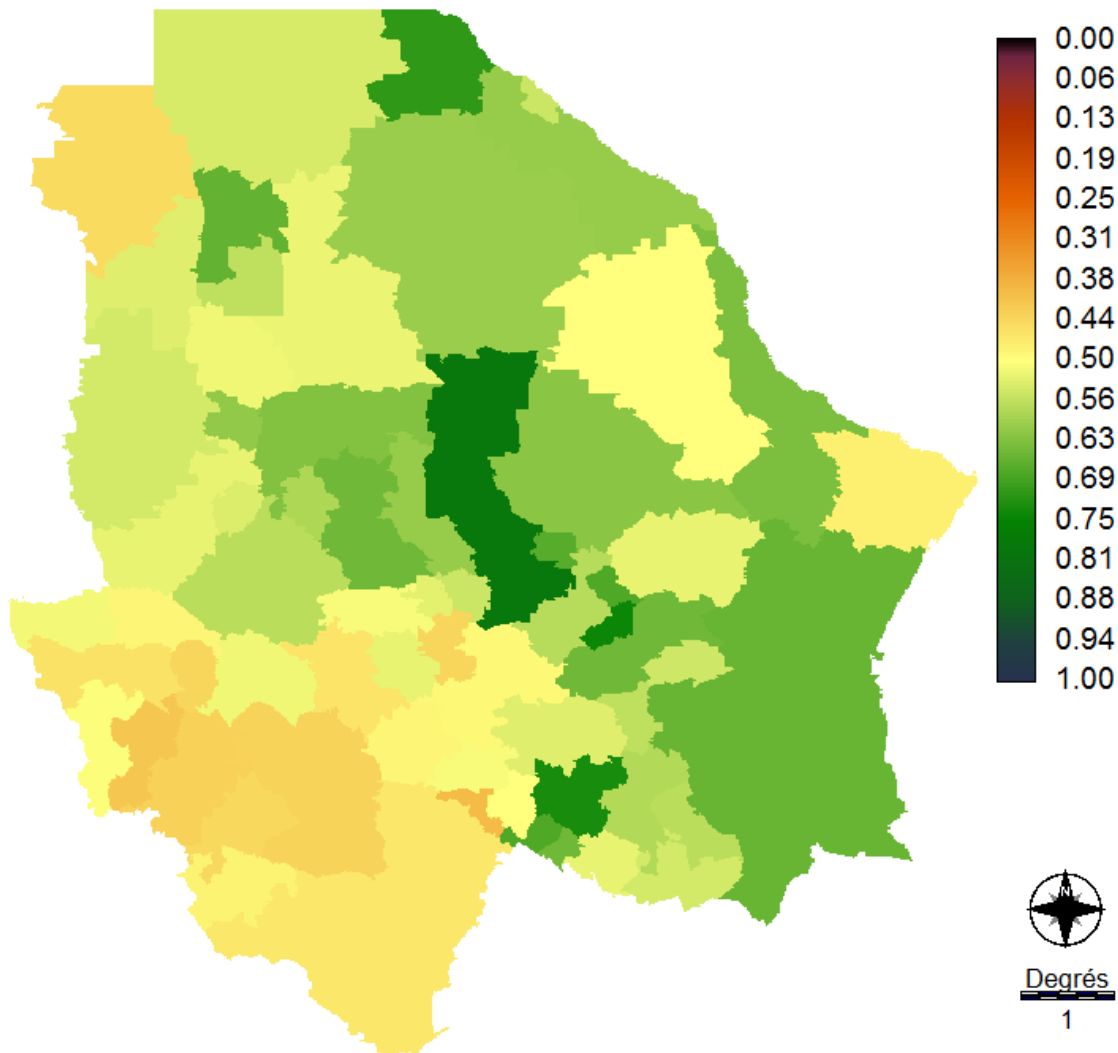
Cette section discute notamment les cartes de composantes obtenues en appliquant des moyennes pondérées aux cartes d'indicateurs, car c'est sous cette forme synthétique qu'ils impactent finalement l'IPE-SIG et qu'ils déterminent la cohérence de ces résultats.

Le rapprochement des cartes d'indicateurs permet de mettre en évidence quelques observations importantes. La première concerne les indicateurs d'accès. Plusieurs municipalités comptent sur de meilleurs accès à l'assainissement qu'à l'eau domestique (Section 3.1.1). Le cas le plus évident est celui de Manuel Benavides qui se distingue par un très faible accès à l'eau domestique, alors qu'il compte sur un score maximal d'accès à l'assainissement. Cette situation interpelle étant donnée la connexion existant entre les deux réseaux considérés. D'ailleurs la comparaison des cartes municipales et locales fait ressortir aussi certaines incohérences (Section 3.3.2). En conséquence, ce qui aurait pu représenter des cas particuliers peut aussi être dû à une incohérence liée aux données. Face au manque d'antécédents concernant cette problématique dans la région d'étude, la seconde explication est privilégiée ici.

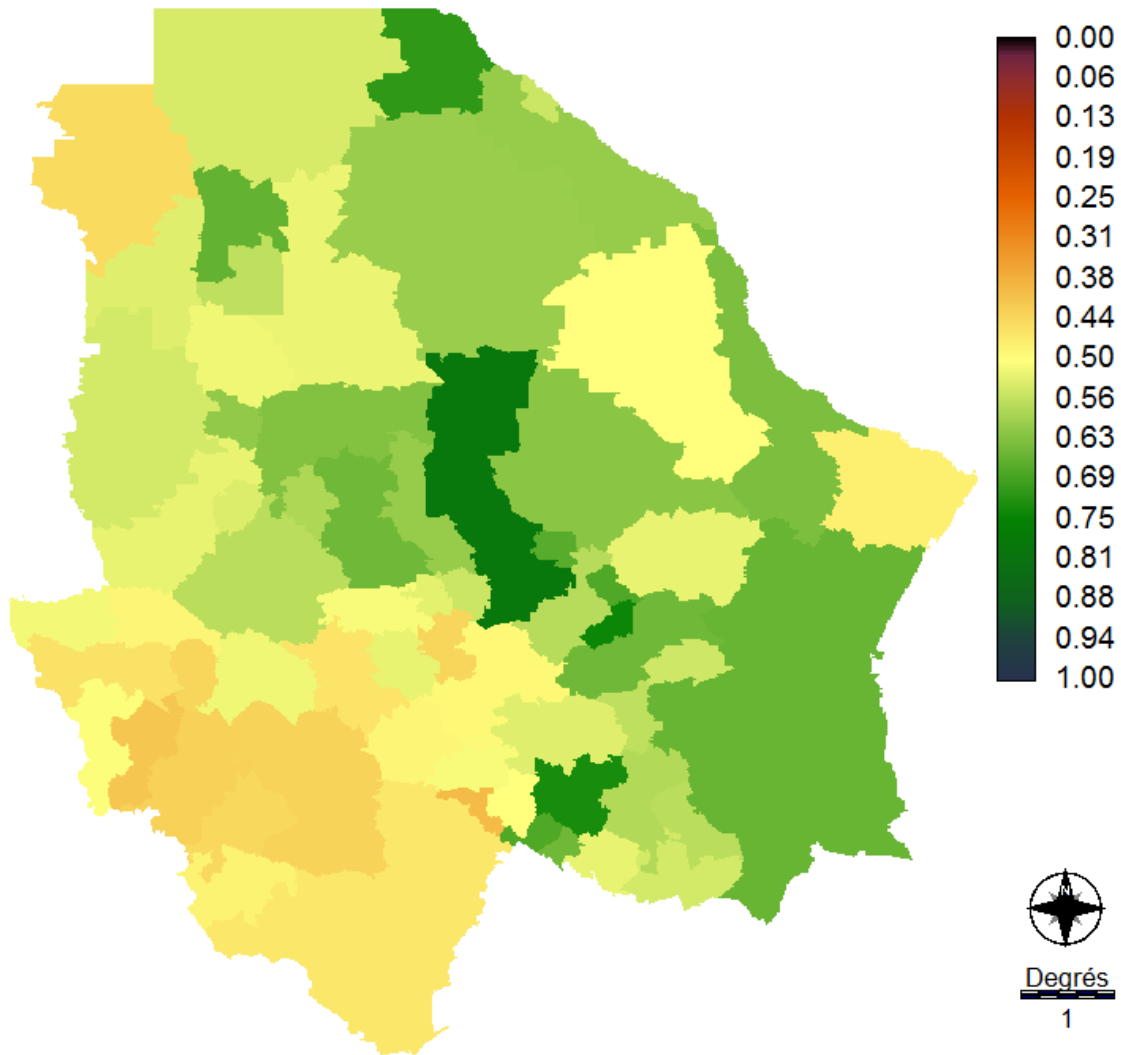
La seconde remarque concerne l'indicateur de mortalité infantile, lequel indique un clivage contraire aux trois autres indicateurs de capacité. La Sierra reçoit les plus fortes aptitudes de l'Etat en ce qui concerne la mortalité infantile, alors que les trois autres indicateurs y recensent des aptitudes inférieures au reste du territoire. A ce sujet encore, il faut mentionner qu'il n'existe pas d'étude portant spécifiquement sur la mortalité infantile pour les municipalités de l'état de Chihuahua. Ce résultat peut seulement être qualifié de surprenant étant donnée l'état de malnutrition infantile qui a été identifié à plusieurs reprises dans les populations Tarahumara qui peuplent la Sierra (Balcáza et Pasquet, 2009 ; Monárrez et Martínez, 2000). Dans ce contexte, ce résultat s'attribue lui aussi à des carences liées aux données, lesquelles pourraient s'expliquer en partie par les difficultés que représente le suivi de la natalité dans des territoires marginalisés des points de vue physiques mais aussi socio-économiques (Section 2.1.1).

Une troisième remarque du même ordre concerne l'indicateur d'usage industriel (U3), pour lequel l'aptitude des quelques territoires qui n'obtiennent ni 1 ni 0,5, ne trouvent pas de justification particulière dans la littérature portant sur l'Etat de Chihuahua. Au contraire, les cartes de ressource, et de préservation environnementales employées ne sont pas redondantes avec celles d'accès, de capacité, d'usage ou encore de qualité. Il s'agit là d'un constat d'autant plus important car contrairement aux trois autres, il constitue l'un des apports les plus notables de l'IPE-SIG (discutés dans la section 3.2.3).

Malgré les limites mentionnées jusqu'ici, les cartes de composantes obtenues pour le calcul de l'IPE tracent un portrait relativement cohérent avec la présentation qui a été faite de la région d'étude (Section 2.1.1). Les cartes de capacité et d'accès confèrent toutes deux des aptitudes inférieures à la Sierra, ce qui fait conjointement écho à la marginalisation de ce territoire (Arreguin et al., 2015 ; CONAPO, 2010 ; Meza, 2012), et à la redondance maintes fois signalée entre ces deux composantes (Heidecke, 2006 ; Lawrence et al., 2003). Une des principales différences entre les deux cartes réside dans l'aspect relativement moyenné des aptitudes de capacité, comparativement celles d'accès. Cela provient directement de l'impact de l'indicateur de mortalité infantile (qui vient d'être commenté). Outre cette limite, quelques nuances caractérisent les plus fortes aptitudes.

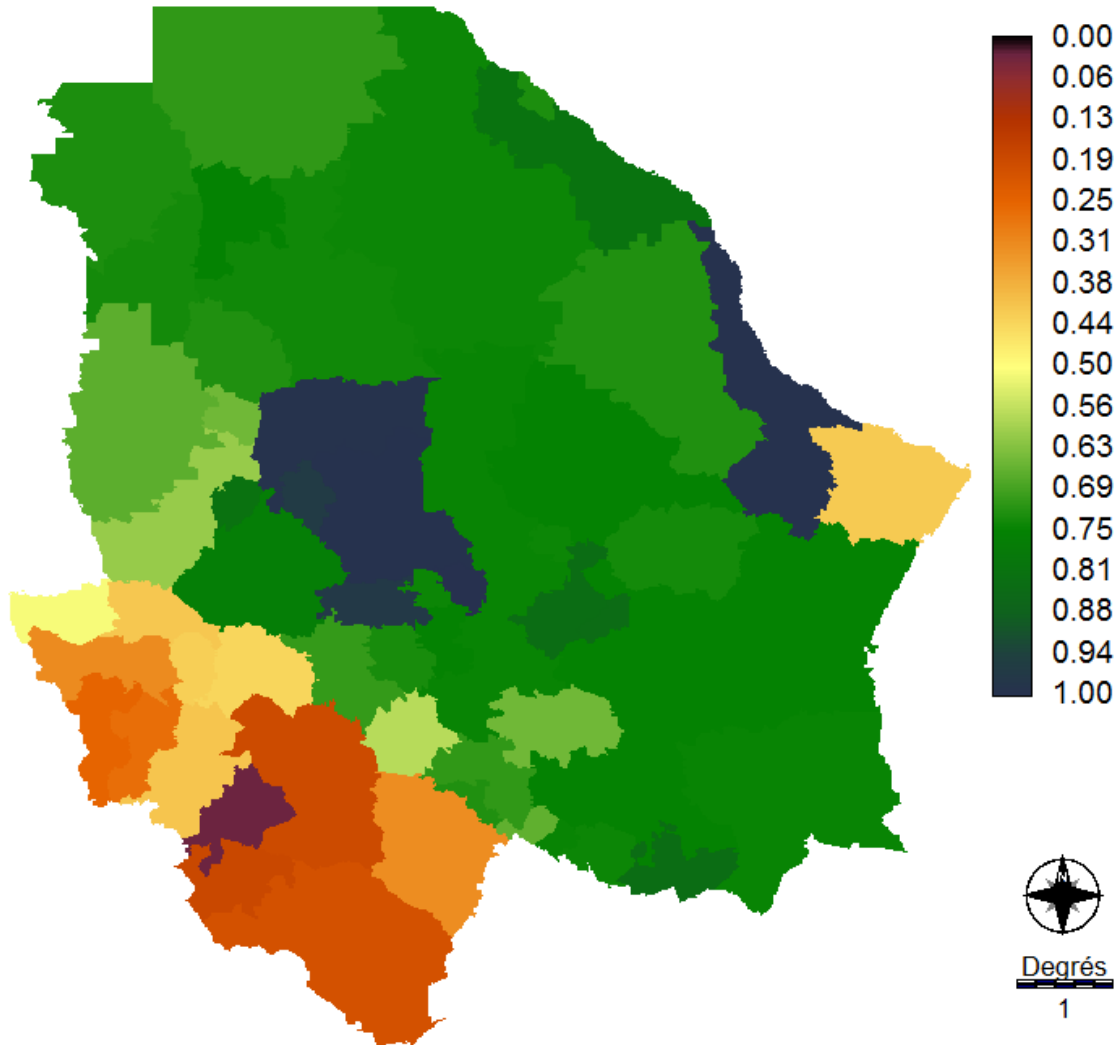


**Carte 49 : Composante de capacité**



**Carte 50 : Composante d'Accès**

Chihuahua, Delicias, Parral et Juárez ont des capacités plus fortes que le reste du territoire (Carte 49), alors qu'elles ne se démarquent pas dans la carte d'accès (Carte 51). Cela peut s'expliquer par l'impact des quatre plus grandes villes de l'état sur les aptitudes de cette composante (Gutiérrez, 2007 ; INEGI, 2010a).

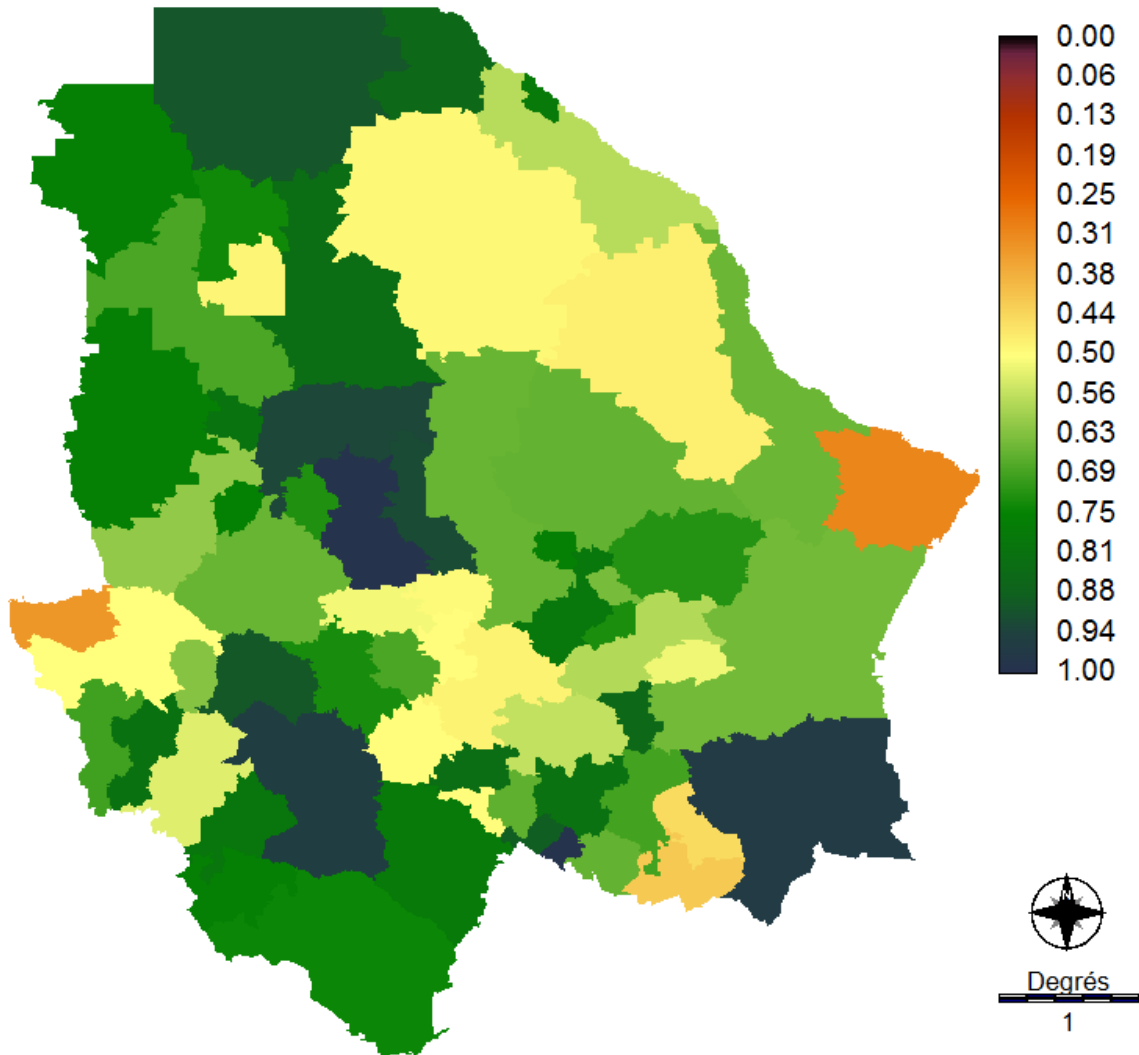


**Carte 51 : Composante d'accès**

En ce qui concerne la composante d'accès en revanche, ce sont les municipalités agricoles de Cuauhtémoc et d'Ojinaga qui se démarquent sous l'impact des indicateurs d'accès à l'irrigation. La technicité agricoles de ces régions expliquent ces fortes aptitudes (Jiménez, 2004 ; Rivera, 2016). Les municipalités agricoles de Delicias, Guadalupe et Coronado apparaissent aussi, bien que plus légèrement. La présence des DR 005, DR 009 et DR103 dans ces régions expliquent leurs fortes aptitudes, même si leur moindre niveau de technification de justifie aussi la différence avec celles de Cuauhtémoc et Ojinaga (Section 2.1.1).

**Les aptitudes de la composante d'usage sont pour leur part majoritairement élevées (Carte 52)**

Carte 52, et traduisent la forte productivité signalée à Chihuahua qui caractérise le terrain d'étude (Section 2.1.1). Les municipalités désertiques de Coyame del Sotol, Ahumada, Galaena et Miguel Benavides se distinguent par de plus faibles aptitudes, confirmant de statut marginalisé de ces territoires. Au contraire, les municipalités agricoles de Nuevo Casas Grandes, Jiménez, Cuauhtémoc se démarquent par des aptitudes particulièrement fortes, confirmant l'impact fort du secteur primaire sur le territoire.



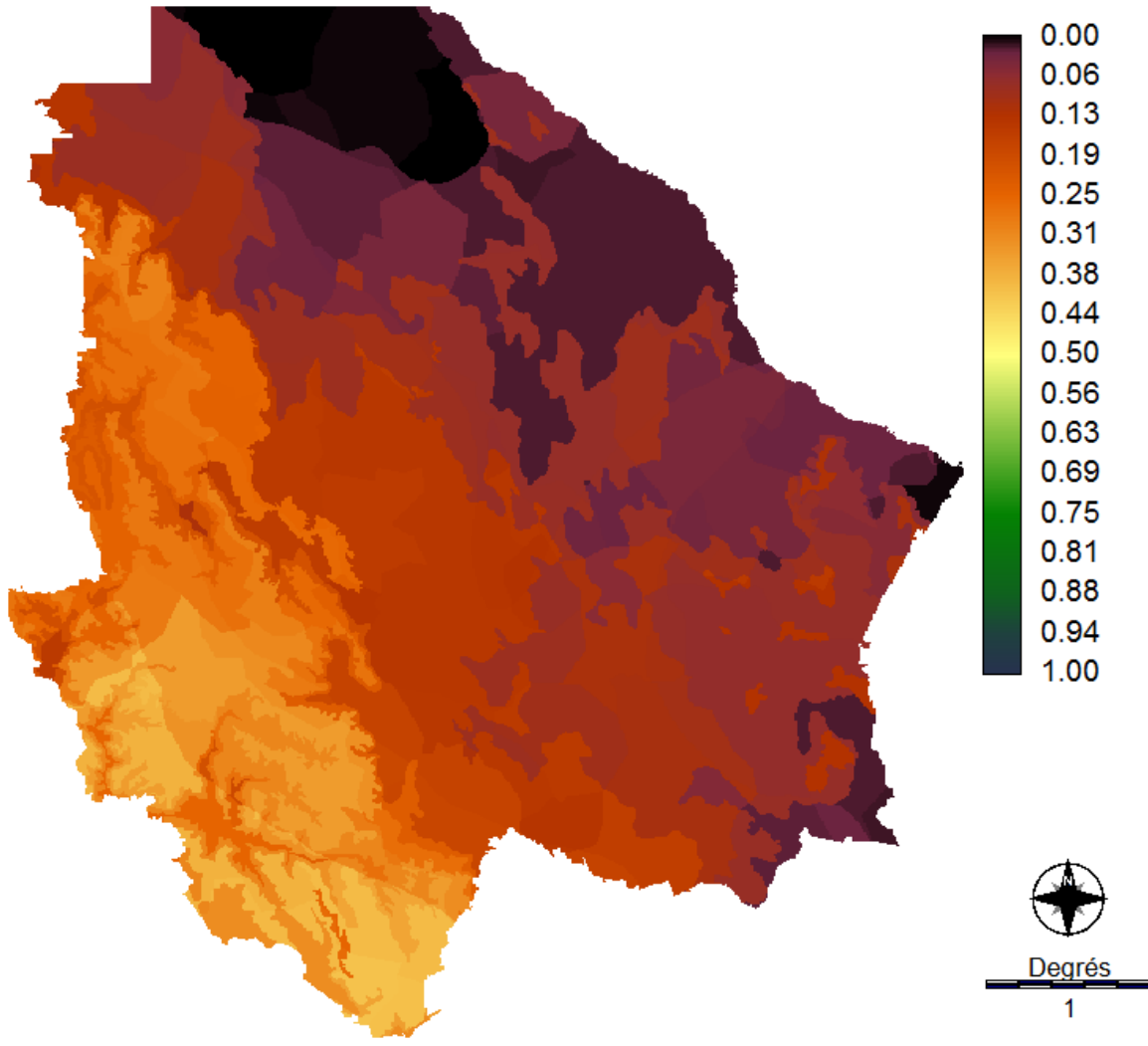
**Carte 52 : Composante d'usage**

Par ses aptitudes élevées cette carte érige Chihuahua comme un modèle dans le contexte mexicain, ce qui est cohérent avec la littérature spécialisée et les rapports publics (réf). Mais en parallèle, la carte indique aussi une certaine marginalisation du désert, qui est plus rarement mentionnée (Quintana, 2009),

alors qu'elle fait écho aux discours d'acteurs collectés dans la sous-région de Delicias (Section 3.4). Les nuances qui apparaissent dans le sud de l'état, ainsi que l'aptitude moyenne de la municipalité de Chihuahua viennent pour leur part des indicateurs d'usage public et industriel. A leur sujet, le manque d'étude spécialisée et les interrogations portant sur les données réduisent les possibilités de discussions. Néanmoins la diversité observée pour l'Etat de Chihuahua dans les aptitudes d'usage public de l'eau présente l'avantage d'attirer l'attention sur la complexité du suivi des usages dits domestiques de l'eau et des problématiques associées au Mexique (Adams, 2010 ; Sisto, 2010).

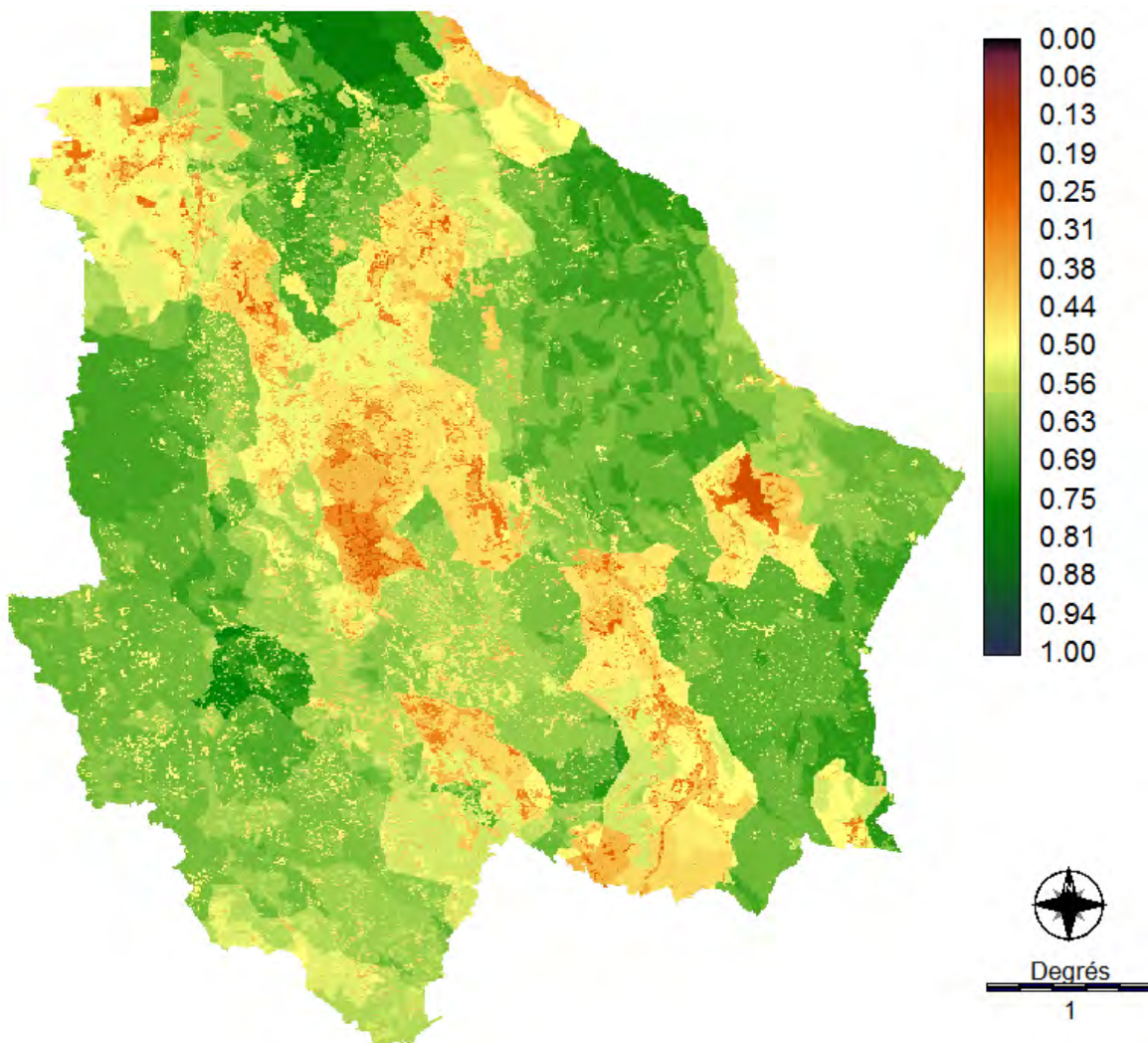
Dans la carte de ressource (Carte 53), les indicateurs sont redondants mais apportent tous des spécificités en termes de délimitations. En outre, la mise en évidence des problématiques d'aridité associées au territoire de chihuahua coïncide avec la présentation qui a été faite du terrain d'étude (Section 2.1.1) et avec l'Atlas de vulnérabilité (Arreguin et al., 2015).





Carte 53 : Composante de ressource

Finalement, la composante d'environnement donne à voir certains impacts de l'anthropisation sur le territoire de l'état (Carte 54). La problématique de surexploitation des aquifères signalée à Chihuahua par CONAGUA (2015b), Arreguin et al. (2015) ou encore Rivera (2016), se distingue nettement par des baisses d'aptitudes (passant de 0,75 à 0,5) qui se concentrent le long des corridors de développement. En parallèle, des baisses similaires apparaissent localement sous l'effet de l'indicateur de dégradation de la couverture arborée (M2), et des contaminations agricoles (Q2). La concentration de ces trois problématiques dans les corridors agricoles génère des aptitudes inférieures à 0,5 (en rouge sur la carte), et font écho à (Nuñez et al., 2015 ; Rivera, 2016).



**Carte 54 : Composante d'environnement**

L'indicateur d'érosion (M1) apparait essentiellement dans le désert, ce qui est cohérent avec les caractéristiques de ce milieu. Néanmoins la faible intensité et la faible résolution des variations correspondantes restreignent l'apport de la carte d'environnement face à une problématique souvent mentionnée dans les études menées localement à Chihuahua (réf). En revanche l'indicateurs de qualité chimique de l'eau, ainsi que celui de traitement de l'eau ne sont que peu notables dans la Carte 54, qui ne fait pas montre des délimitations municipales correspondantes. Leur influence se limite à une réduction globale des aptitudes de l'état, qui n'atteignent pas le score maximal de 1. Cela pose question sur ce territoire où la contamination chimique de l'eau est analysée comme intense et dangereuse pour l'homme (Dozal et al., 2005 ; Hernández-Garcia et al., 2008).

En somme, la technique « *FUZZY* » permet de normaliser les indicateurs de l'IPE de manière relativement satisfaisante. De fait, elle génère 19 panoramas échelonnés de manière adimensionnelle et uniforme et peuvent donc être agrégés entre eux pour calculer les résultats finaux de l'IPE-SIG. Les cartes correspondantes présentent des limites, mais les principales tendances hydrologiques, environnementales et socio-économiques du territoire de Chihuahua se retrouvent de manière reconnaissable dans les cartes de composantes (exception faite de certaines problématiques de qualité de l'eau, lesquelles sont discutées dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cela permet de valider dans une certaine mesure la construction des indicateurs en termes d'aptitudes mais aussi d'interdisciplinarité et de représentation cartographique. Reste à savoir ce qu'il advient de tout cela après la phase d'agrégation finale.

### **3.2 Application municipale de l'IPE-SIG dans l'Etat de Chihuahua**

L'IPE-SIG municipal est élaboré à partir d'indicateurs environnementaux spécifiques, mais aussi en adaptant les échelles de calcul de l'IPE afin de renforcer le caractère interdisciplinaire du diagnostic (Section 1.4.1). Les résultats comprennent de fait des variations inter-municipales mais aussi intra-municipales. Lorsqu'elles correspondent à des baisses d'aptitudes, elles signalent des enjeux de gestion problématiques. Dans le cas contraire, il s'agit de facteurs (socio-économiques, hydrologiques ou environnementaux) réduisant la pauvreté en eau. L'analyse détaillée des variations des scores observés

sur la carte permet donc d'identifier différents degrés de pauvreté en eau et surtout différents enjeux. C'est ce dont rend compte cette section en prêtant attention aux formes dessinées sur les cartes : une grande partie d'entre elles parle de fait de variations municipales, mais d'autres témoignent aussi de spécificités locales et régionales. Après quoi les résultats sont discutés en fonction de la visibilité qu'ils octroient aux problématiques de ressource, d'environnement et de développement. La discussion considère les défis relatifs à l'interdisciplinarité mais aussi à la clarté des résultats.

### 3.2.1 *Interprétation des variations inter-municipales*

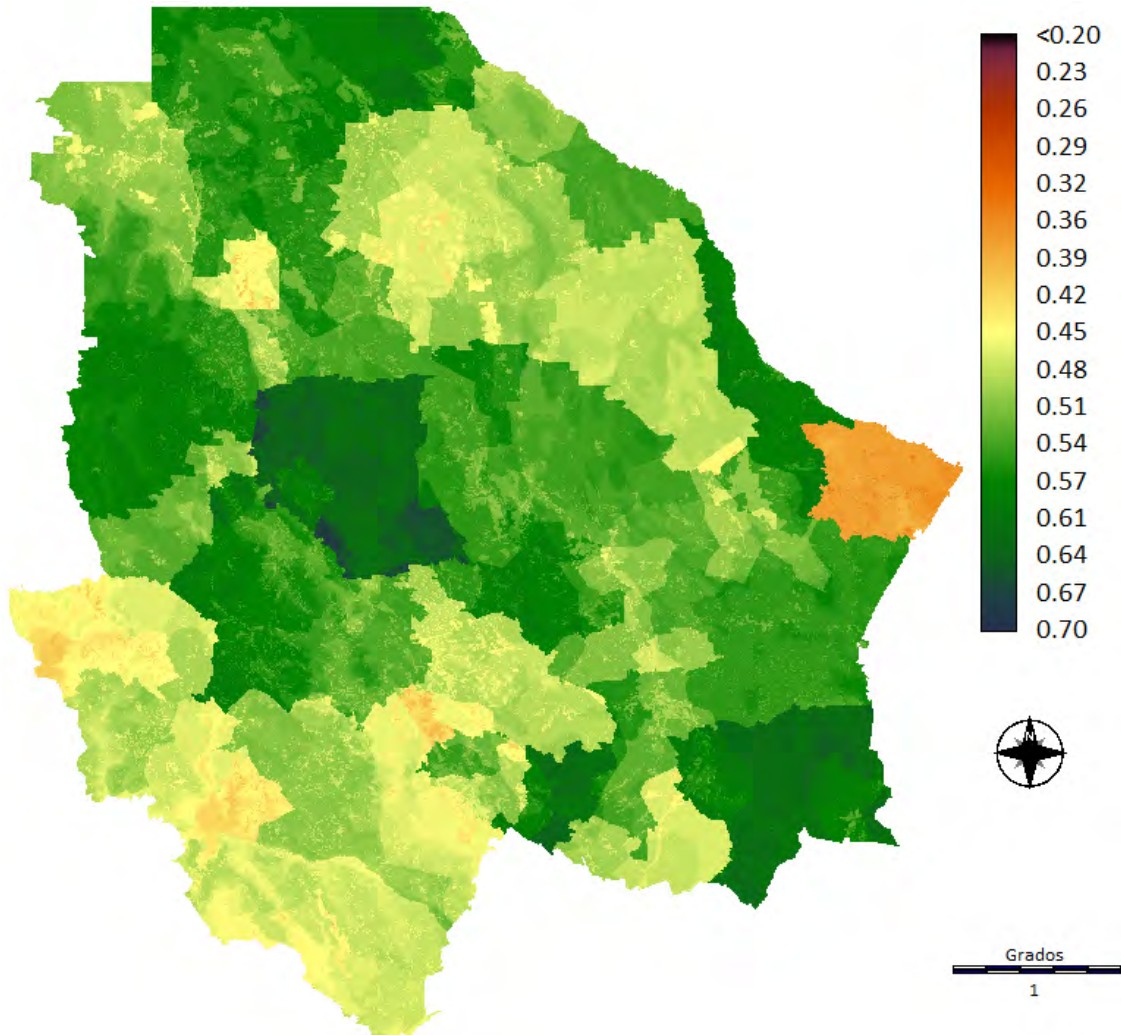
Les résultats, appelés IPE-SIG municipal, sont essentiellement supérieurs à 0,50, ce qui rend compte d'une pauvreté en eau relativement peu préoccupante (Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Maheswari et al., 2017). Cependant, les IPE inférieurs à 0,48 signalent tout de même des territoires problématiques. Dans ce contexte, les variations les plus fortes se situent au niveau municipal, ce qui explique que les délimitations correspondantes soient prédominantes sur la majeure partie du territoire. Le fait que les indicateurs des trois composantes socio-économiques soient élaborés à l'échelle municipale, et qu'en outre deux indicateurs de qualité de l'eau le soient aussi expliquent cette prédominance. L'observation des variations existant entre les municipalités de l'Etat de Chihuahua permet d'interpréter les formes de pauvreté en eau qui s'y expriment.

- Réduction de la pauvreté en eau par la production et les infrastructures de développement

Les résultats les plus forts (compris entre 0,59 et 0,68) sont recensés dans des municipalités qui comptent conjointement des grandes villes et des activités agricoles et minières (Cuauhtémoc, Juárez, Ojinaga, Jiménez et Parral).

Chihuahua et Delicias font figures d'exceptions : leurs WPI restent supérieurs à 0,50 mais ils sont légèrement plus faibles et plus contrastés que ceux des autres pôles du territoire. De fait une frange de territoire située entre Ojinaga et Parral au sud est de l'état – et qui inclue la région agricole environnant Delicias – dessine des délimitations qui ne sont pas municipales. Et la municipalité de Chihuahua est

pour sa part traversée par une ombre claire (témoignant d'aptitudes inférieures au reste de la municipalité). Ces régions sont caractérisées par de fortes problématiques environnementales, et les formes mentionnées sont d'ailleurs celles des aquifères (la présentation de ces facteurs environnementaux est détaillée dans la Section 3.2.2).



**Carte 55 : IPE-SIG obtenu avec des indicateurs socio-économiques à l'échelle municipale**

Au contraire, quelques municipalités situées en bordure de l'Etat recensent des scores inférieurs à 0,40 (en orange sur la carte). Le cas le plus notable est celui de Manuel Benavides (avec 0,37) : tout le territoire de cette municipalité située à l'extrémité est de Chihuahua (cf présentation du terrain d'étude)

obtenant en effet un très faible IPE. L'étude des cartes d'indicateurs permet d'associer ces scores à des problématiques de ressources, mais aussi d'accès et d'usage qui renforcent sa marginalité géographique par une marginalité d'ordre socio-économique. A cette municipalité particulièrement reconnaissable, viennent s'ajouter des territoires plus restreints situés dans plusieurs municipalités de la Sierra ainsi que dans celles de Galaena et d'Ahumada. Même si les délimitations identifient des problématiques environnementales (dégradation de la couverture arborée), toutes ces municipalités sont caractérisées par l'absence de ville de plus de 2 500 habitants.

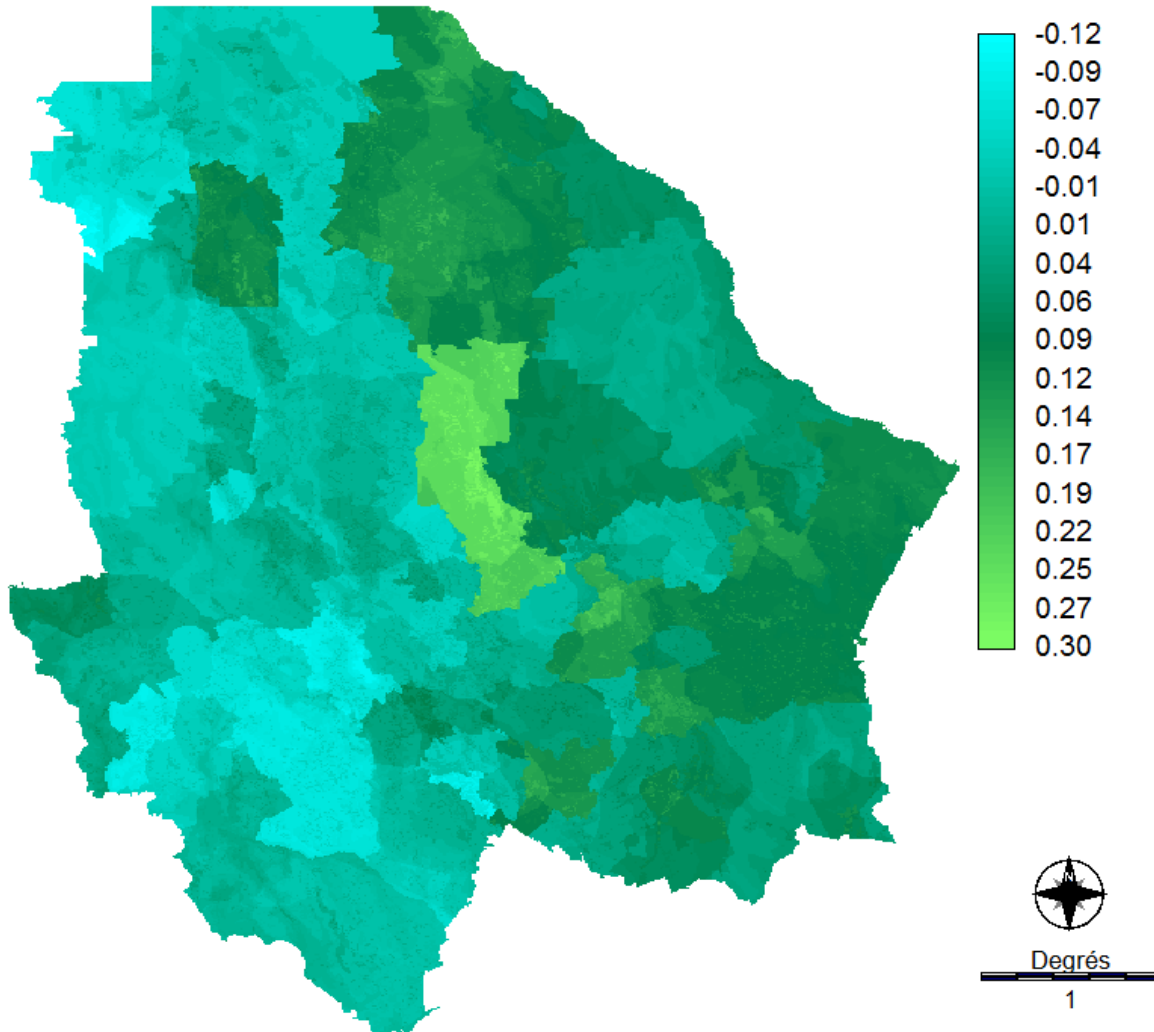
Enfin, la Sierra ainsi que les municipalités désertiques reçoivent des résultats inférieurs ou égaux à 0,50. Même Ahumada et Guachochi qui comprennent des villes de plus de 2 500 habitants, obtiennent des résultats de cet ordre. Ainsi, les entités que sont la Sierra et le désert *chihuahuenses* ont-elles une pauvreté en eau plus forte que les corridors de développement. Cela témoigne de l'impact positif des infrastructures de développement et de la productivité économique sur l'IPE.

D'après ces observations, les résultats mettent avant tout en évidence la présence ou l'absence de pôles d'urbanisation et d'activité entre les municipalités de Chihuahua. Cependant, les délimitations municipales qui ont concentré l'analyse jusqu'ici, illustrent à la fois des enjeux de capacité, d'usage et d'accès, mais aussi de qualité de l'eau. Ceux-ci interviennent de différentes manières selon les municipalités considérées, mais seule l'analyse des cartes d'indicateurs permet d'obtenir plus d'information sur les problématiques spécifiques à chacune d'elles. Dans ce contexte, une se pose néanmoins en ce qui concerne la redondance de l'IPE avec l'IDH.

- IDH-IPE

Il faut rappeler que la composante de capacité de l'IPE est construite comme un IDH : les mêmes indicateurs de l'IDH sont en effet employés pour le calcul de la composante. La Carte 56 est élaborée en soustrayant les résultats de l'IPE à ceux de l'IDH : l'objectif étant d'analyser leurs similitudes et leurs différences. En l'occurrence, les résultats positifs indiquent que l'IDH est supérieur à l'IPE ; alors que les résultats négatifs indiquent le contraire. Enfin, les territoires qui recensent des scores nuls recensent des scores égaux pour les deux indices.





**Carte 56 : Résultats obtenus en soustrayant l'IPE à l'IDH**

La majeure partie de la carte est comprise entre -0,10 et 0,10. Cela signifie que les différences existant entre l'IDH et l'IPE sont restreintes, et qu'une corrélation existe effectivement entre les résultats des deux indices. Cependant, les scores montent jusqu'à 0,30, et les diverses tendances notables sur la carte indiquent que des nuances non linéaires existent. Les variations correspondantes apportent des renseignements en ce qui concerne l'interprétation de l'IPE.

De fait, les plus fortes dissemblances existant entre l'IPE et l'IDH sont concentrées dans la municipalité de Chihuahua, dont les contours sont nettement identifiables au sein de la carte. En moindre mesure, les municipalités de Delicias (et Meoquí), Parral, et Juárez présentent aussi des scores élevés (supérieurs à

0,15). Ces résultats indiquent des IPE plus faibles que les IDH. Ils sont de fait caractérisés par de fortes concentrations d'activités agricoles et de population dans un milieu semi-aride. A ce titre, ils obtiennent de forts IDH. Le fait que leurs IPE soient inférieurs à ces IDH indique que les quatre autres composantes de l'IPE nuancent la forte capacité de ces municipalités. En outre, le fait que les limites de Chihuahua, mais aussi Delicias et Meoquí se démarquent sur la carte permet de conclure que des indicateurs d'usage, d'accès ou de qualité de l'eau séparent les deux diagnostics. Autrement dit, le contexte semi-aride ne justifie pas à lui seul l'infériorité de l'IPE par rapport à l'IDH à Chihuahua.

Outre ces exceptions, la Carte 56 singularise les entités territoriales que sont la Sierra et les déserts. En effet, les municipalités désertiques concentrent majorité des scores positifs observables sur le territoire. Des variations municipales se dessinent dans cette entité territoriale, mais une tendance régionale s'impose malgré tout dans ces territoires où les facteurs hydrologiques sont décisifs pour l'IPE. La Sierra recense pour sa part des scores compris entre -0.1 et 0,02, indiquant que les deux indices y sont similaires ou que l'IPE y dépasse l'IDH. Cela s'explique par le fait que les facteurs hydrologiques et environnementaux nuancent significativement les faibles capacités de ces territoires. Dans cet ensemble, Moris reçoit des scores plus forts (allant de 0,06 à 0,09) : ils sont dus à des IPE particulièrement bas en ce qui concerne les indicateurs d'eau souterraine, d'usage public et surtout d'usage industriel.

Dans les corridors de développement en revanche, la carte 21 recense des scores allant de -0,11 à 0,30. Cette diversité confirme que grâce aux quatre composantes qui accompagnent celle de capacité, l'IPE donne à voir des enjeux de pauvreté en eau qui ne sont pas liés au développement humain. Mais les problématiques spécifiques de chaque territoire ne sont identifiables qu'en confrontant les résultats de l'IPE municipal avec les cartes d'indicateurs. A ce sujet cependant, la carte singularise l'ensemble régional situé entre Ojinaga, Delicias et Jiménez (qui a déjà été mentionné) par rapport au reste du territoire. Dans cet ensemble, l'indicateur de surexploitation des aquifères (détaillé dans la section 3.2.2) distingue négativement les scores de l'IPE par rapport à ceux de l'IDH. Et des variations intra-municipales permettent aussi d'identifier l'impact d'autres facteurs environnementaux et hydrologiques.

Finalement, la carte met en avant des différences, légères mais significatives, entre l'IPE et l'IDH calculés dans l'Etat de Chihuahua. En particulier, les deux indices font ressortir des tendances régionales distinctes : comparativement à l'IDH, l'IPE réduit l'aptitude des territoires désertiques tandis qu'il

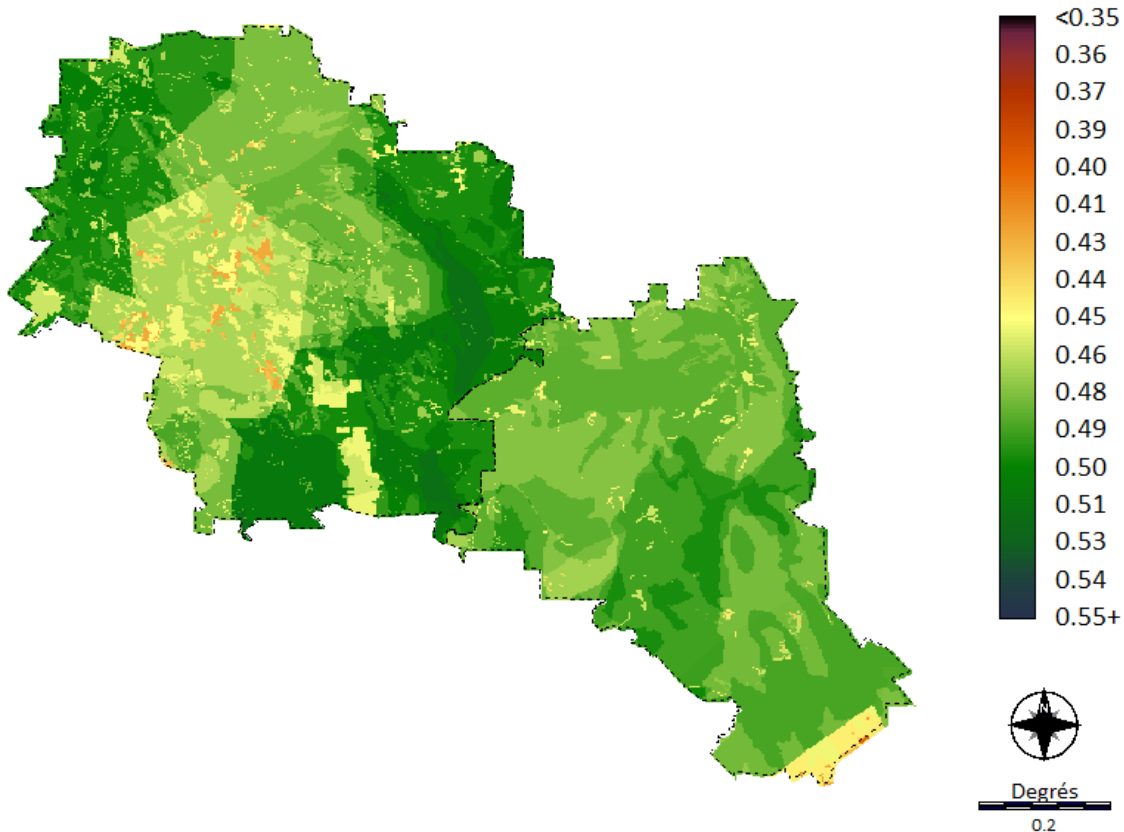


augmente ceux de la Sierra. Cela tend à insister sur l'importance des facteurs hydrologiques et environnementaux. Mais ces derniers n'expliquent pas toutes les variations existant entre les deux indices. L'IPE met ainsi en évidence des enjeux d'usage, d'accès et de qualité de l'eau qui ne sont pas systématiquement liés au développement humain. Ces résultats confirment la pertinence et la spécificité de l'IPE pour l'élaboration de diagnostics de pauvreté en eau. Néanmoins, la visibilité des facteurs qui font sa spécificité devrait être plus grande : les formes non municipales posent particulièrement question.

### *3.2.2 Visibilité des enjeux environnementaux et hydrologiques à travers les variations intra-municipales*

L'IPE municipal donne à voir des délimitations qui ne sont pas municipales. Celles-ci dessinent, directement mais aussi indirectement, des variations environnementales. L'observation des nuances intra-municipales approfondit la compréhension de cette question, et génère une analyse plus précise des résultats.

Des taches plus ou moins claires et des ombres plus légères qui ne correspondent pas aux délimitations municipales, apparaissent de manière plus ou marquée dans la Carte 57.



**Carte 57 : SIG-IPE municipal à Ahumada et Coyame del Sotol**

Les aptitudes correspondantes sont influencées par les aptitudes municipales, mais elles ont de fait des caractéristiques propres qui les singularisent au sein des ensembles municipaux. Ce sont en l'occurrence les indicateurs (cartographiques) environnementaux qui expliquent ces variations d'aptitudes moins tranchées que les variations municipales. Parce qu'elles sont plus ténues, mais aussi parce que cela permet de les considérer en s'émancipant des variations municipales, elles sont interprétées dans le cadre d'analyses intra-municipales.

- Des taches pour les variations locales

Les taches sont définies comme des territoires strictement délimités, qui ne sont pas municipaux. Elles peuvent être plus aptes ou moins aptes que les ensembles géographiques où elles sont intégrées, selon que les facteurs correspondant augmentent ou réduisent la pauvreté en eau. En l'occurrence, elles tirent respectivement vers le jaune dans les municipalités les plus riches en eau de l'Etat de Chihuahua et

vers le rouge dans les municipalités les plus pauvres en eau. Dès lors, les facteurs correspondant tendent surtout à diminuer l'IPE municipal : ils correspondent donc à des challenges de gestion notables. Selon l'intensité des problématiques ainsi signalées, les taches sont plus ou moins marquées. Dans le cas de Ahumada et Coyame de Sotol, les variations vont de 0,04 à 0,01<sup>179</sup>. Ce faisant, elles sont aussi plus ou moins visibles : sur la carte *estatal* les enjeux les aires les plus problématiques génèrent de plus forts contrastes de couleurs. Il s'agit d'un avantage dans le cadre de la prise de décision à cette vaste échelle, mais à l'échelle municipale même les variations légères peuvent être intéressantes pour attirer l'attention sur des problématiques peu visibles. Les zooms sur chaque territoire municipal constituent à ce titre des outils pertinents puisqu'ils permettent d'aborder et d'identifier précisément les enjeux réduisant la pauvreté en eau localement.

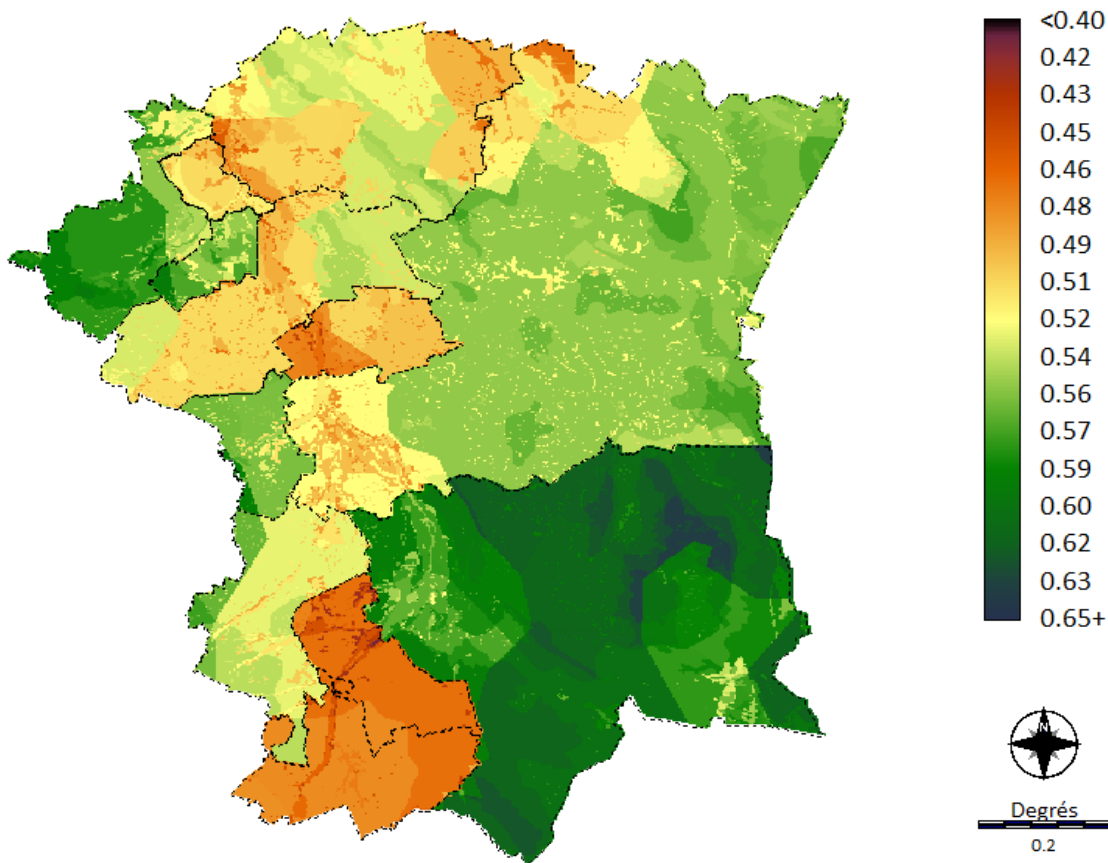
Pourtant, si la forme des taches et leur localisation aident à définir la nature de certains enjeux évidents (associés par exemple à l'agriculture irriguée), ces deux caractéristiques ne suffisent pas toujours pour les enjeux moins reconnus (comme la dégradation des USV ou l'érosion des sols). Dans ces seconds cas, seule la consultation des cartes d'indicateurs garantie avec certitude l'interprétation des variations locales définies comme des tâches. En ce qui concerne l'IPE municipal, la majorité des tâches ont des superficies restreintes, constituant des îlots de couleur au sein de leur municipalité. Mais sous cette forme elles sont soit dues à la contamination agricole soit à la dégradation de l'USV (l'indicateur d'érosion intervenant en moindre mesure sur le territoire *estatal*). De fait, l'étude des cartes d'indicateurs définit qu'elles mettent en évidence :

- ✓ des problématiques de contamination agricole à plusieurs endroits de l'état, elles génèrent des baisses majoritairement égales à 0,03 dans la sous-région de Delicias lesquelles peuvent atteindre 0,04 quand elles sont associées à la dégradation de la couverture arborée ;
- ✓ des problématiques de déforestation et de contamination agricole aussi dans les corridors de développement qui occasionnent donc des baisses de 0.04 ;
- ✓ des problématiques de déforestation ou de contamination agricole dans la sierra qui occasionnent des baisses égales à 0,02 ;
- ✓ et des problématiques de dégradation des couvertures végétales associées aux dynamiques d'urbanisation surtout dans les corridors agricoles.

---

<sup>179</sup> C'est d'ailleurs le cas de la majeure partie du territoire considéré, même si quelques rares municipalités recensent aussi des variations inférieures à 0,01.

Néanmoins, d'autres taches plus étendues que les précédentes transcendent les limites municipales de manière singulière. Ces tâches sont particulièrement visibles entre Delicias et Jiménez, ainsi que dans le sud d'Ojinaga, où les formes ainsi dessinées sont continues et étendues et les différences d'aptitudes sont fortes (entre 0,02 et 0,04). Cela rend à la fois importante et facile l'identification de la problématique de sur-exploitation des aquifères dans ces régions fortement marquées par les activités agricoles.



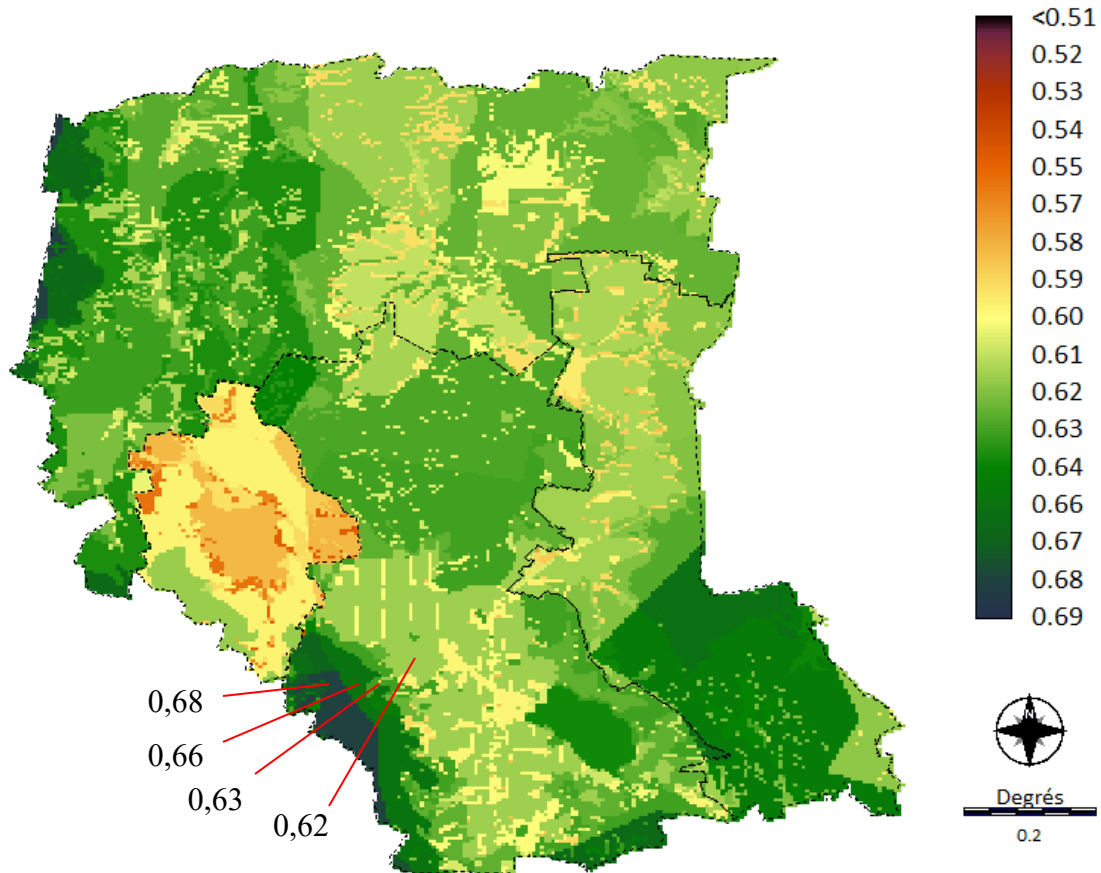
**Carte 58 : SIG-IPE municipal dans les régions agricoles d'Ojinaga, Delicias et Jiménez**

Cette même problématique est aussi visible dans la région de Cuauhtémoc, mais de manière moins claire, car moins étendue, moins intense (0,03 maximum) et moins linéaire qu'à Delicias et à Ojinaga. Ces second types de tâches pourraient éventuellement être intégrés dans la seconde catégorie. Mais il est à noter qu'au Mexique la délimitation des aquifères est particulièrement rectiligne, ce qui facilite leur

délimitation ainsi que leur identification. De plus, même si elles acquièrent parfois un aspect régional (comme dans le cas de Delicias), elles n'impliquent pas les mêmes acteurs (ni les mêmes enjeux) que les ombres : les tâches étant fondamentalement liées à des pratiques économiques, tandis que les ombres sont associées à des problématiques physiques qui transcendent les processus anthropiques.

- Des « ombres » pour les variations régionales

Comme les taches, les « ombres » sont définies comme des délimitations non municipales, mais contrairement à celles-ci, elles se caractérisent par des continuités territoriales occasionnant des délimitations plus floues. Ces variations (que la forme singulière éloigne des facteurs socio-économiques) sont encore plus dures à identifier que les précédentes. Pour les étudier les cas de municipalités présentant des scores forts et faibles sont commentés ci-dessous (carte 39 et 40).



**Carte 59: SIG-IPE municipal dans la région agricole de Cuauhtémoc**

Ainsi les aptitudes de la région de Cuauhtémoc sont comprises entre 0,55 et 0,68 : ces scores identifient quelques spécificités locales dans le contexte d'une pauvreté en eau moyenne (Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Maheswari et al., 2017). Concrètement, sur ce territoire, les délimitations municipales n'expliquent pas toutes les variations de l'IPE, et les plus fortes aptitudes couvrent des surfaces très localisées. La municipalité de Cuauhtémoc inclut le seul territoire avec 0,68, lequel adopte une forme partiellement rectiligne, caractéristique des indicateurs associés aux aquifères. Mais il est notable que dans son environnement proche, l'IPE passe de 0,66 à 0,63 puis à 0,62. Cette évolution est associée à d'autres enjeux environnementaux qui sont en l'occurrence d'ordre climatique. Et de la même façon dans la région désertique qui englobe les municipalités d'Ahumada et de Coyame de Sotol les facteurs environnementaux forment aussi différentes ombres. L'érosion, les dynamiques associées aux eaux souterraines, ainsi que le climat s'associent ainsi à Ahumada de telle sorte que les aptitudes passent de 0,51 à 0,50 puis de 0,48 à 0,47.

Ces variations qui semblent légères, sont en réalité importantes car elles interviennent sur tout le territoire. Si leur délimitation exacte est délicate, elles génèrent malgré tout certaines tendances régionales qui peuvent s'apprécier sur la carte. En particulier la composante de ressource nuance les hautes aptitudes socio-économiques des corridors de développement par rapport au contexte semi-aride. C'est pourquoi l'IPE n'y atteint pas l'aptitude maximale. Au contraire, dans la Sierra elles nuancent les faibles aptitudes socio-économiques élevant donc l'IPE.

Enfin les facteurs environnementaux génèrent des variations territoriales qui sont intéressantes pour obtenir des diagnostics nuancés et précis. Cependant, elles restent un peu légères, et leur clarté demeure problématique : seul un examen détaillé associant l'IPE avec les cartes d'indicateurs permet d'identifier l'ensemble de ces dimensions

### *3.2.3 Discussions : Identifier les enjeux de pauvreté en eau à travers l'IPE-SIG municipal*

Même si elle comprend quelques limites, la compilation de données ainsi que la méthodologie EMC appliquées dans l'Etat de Chihuahua permettent de construire une cartographie de l'IPE intéressante. Ces résultats sont discutés en ce qui concerne leur capacité à refléter les problématiques socio-économiques certes, mais surtout environnementales. Il s'agit en particulier de discuter les corrélations des résultats l'IPE avec ceux de l'IDH, mais aussi la place de la composante de ressource en leur sein. Cela porte aussi à s'intéresser aux apports de la cartographie et notamment des unités de calcul mixtes (dans le sens où elles intègrent des échelles administratives, hydrologiques et environnementales).

- IPE-SIG et pôles de développement : paradoxes d'un lien multi-facette

L'IPE-SIG municipal, calculé à travers une EMC à partir d'échelles et d'indicateurs hydrologiques et environnementaux spécifiques identifie plusieurs enjeux dans l'hétérogénéité du territoire considéré. Néanmoins, les variations les plus évidentes sont d'ordre municipal et témoignent avant tout de la présence ou de l'absence de pôles (urbains ou économiques) au sein des municipalités de Chihuahua.

Ce diagnostic est pertinent et reflète une des dimensions importantes de la pauvreté en eau, à savoir qu'elle est réduite dans les territoires développés (Section 1.1.1). En ce sens, il fait écho aux résultats de Rentería et Pérez (2010) et de nombreuses autres études de l'IPE, qui signalent de plus faibles pauvreté en eau dans les territoires productifs et riches en infrastructures. Cela constitue une caractéristique importante de l'IPE-SIG qui s'inscrit dans une tradition de calcul qui a fait le succès de l'indice (Anju et al., 2017 ; Fenwick, 2010 ; Gong et al., 2017 ; Manandhar et al., 2012). Pourtant, ce qui est une force est aussi une faiblesse.

La mise en évidence des pôles de développement sur le territoire constitue en effet un apport relatif pour l'IPE, puisqu'un autre indice, plus simple, plus renommé et inclus dans l'IPE, permet déjà de le faire (Heidecke, 2006 ; Lawrence et al., 2003). A ce titre, la corrélation observée entre l'IPE-SIG et l'IDH dans la Carte 56 est critiquable. En outre, comme avec la méthode statistique, cette corrélation est d'autant plus problématique qu'elle trouve sa source dans des redondances internes de l'indice : les cartes d'indicateurs d'accès et de capacité obtenus avec la méthode SIG étant similaires à plusieurs titres. Cela représente une limite méthodologique fondamentale, signalée négativement par la littérature concernant l'IPE mais aussi – plus généralement – par celle concernant les indices (Garriga et Foguet, 2010a ; OECD et JRC, 2008 ; Vollmer et al., 2016). A ce sujet, il faut remarquer que l'IPE-SIG n'apporte pas de réponse définitive.

Mais l'étude des cartes d'indicateurs apporte des éléments de discussion sur les redondances internes de l'IPE-SIG. En effet, il est apparu qu'en plus des indicateurs de capacité et d'accès, il convient d'ajouter Q3 (indicateur de traitement des eaux résiduelles), U3 (indicateur d'usage industriel), mais aussi – dans une certaine mesure – Q1 (indicateur de qualité de l'eau) dans la liste des indicateurs redondants. Dans cette liste Q3 et U3 se distinguent par des corrélations à la fois directe, cohérente et particulièrement flagrante avec les indicateurs d'accès et de capacité. En l'occurrence, la corrélation de Q3 contredit l'un des postulats énoncés par Sullivan et al. (2002), à savoir que le développement devrait affecter positivement les composantes d'accès, de capacité et d'usage, alors qu'il affecterait négativement les deux autres composantes. En parallèle, elle explique la corrélation existant entre l'IPE et l'IDH. Plus encore, elle la justifie en la mettant en perspective avec le cadre conceptuel du développement durable où les infrastructures servent aussi à la protection de l'environnement qui sustente les sociétés humaines (United Nations, 1998, 2017). Ces remarques questionnent l'impact du développement sur la pauvreté



en eau et vont dans le sens de préciser – ou revoir – les lignes directrices concernant l'élaboration des indicateurs de l'IPE.

Les corrélations soulignées pour Q1 avec les niveaux de développement vont dans un sens légèrement différent. Le fait est qu'elles trouvent leurs origines dans des manques de données. Ce faisant, elles confirment une nouvelle fois le caractère limité des données publiques (Section 3.1.3). Mais dans ce contexte, elles indiquent surtout leur tendance à insister positivement sur les territoires développés (Section 2.2.3). Ce faisant, elles insistent sur l'intérêt d'opérer un tri parmi ces données afin de rationaliser le lien de l'IPE avec les niveaux de développement. Dans ce sens, les indicateurs de ressource et de préservation environnementale employés pour former l'IPE-SIG ne sont pas redondants avec ceux de capacité et d'accès. Au contraire, les indicateurs de ressource sont favorables à la Sierra, tandis que la préservation environnementale est montrée comme problématique dans les corridors de développement. Ces deux types de facteurs se retrouvent dans la carte d'IPE-SIG municipal et le différencient justement de l>IDH.

- Calculer l'IPE à travers des ressources SIG pour favoriser l'interdisciplinarité des résultats

La comparaison de l'IPE-SIG avec l>IDH (Carte 56) rend visible la corrélation existant entre les deux indices (Section 1.3.3) ; mais elle témoigne aussi du fait que certains facteurs les singularisent. Il s'agit principalement, mais pas exclusivement, d'indicateurs hydrologiques et environnementaux.

L'IPE-SIG municipal permet d'identifier des variations hydrologiques et environnementales qui impactent le territoire de Chihuahua de diverses manières. Tout d'abord, ces variations nuancent les aptitudes des municipalités développées situées dans des écosystèmes désertiques. Les facteurs hydrologiques expliquent ainsi que la région de Cuauhtémoc, qui bénéficie d'écosystèmes plus cléments (Annexe 1), atteignent les scores les plus élevés, tandis que le reste des corridors de développement obtient des aptitudes moyennes. Ces mêmes facteurs, associés aussi à des forces environnementales, nuancent aussi les faibles capacités de la Sierra, leur octroyant de la sorte une aptitude moyenne et non faible. Ils distinguent l'IPE-SIG municipal du diagnostic réalisé par Rentería et Pérez (2010), dans lequel les territoires développés reçoivent les aptitudes maximales. Cela atteste que selon les choix méthodologiques effectués (sélection des indicateurs mais aussi des échelles de calcul commentées ci-

dessous), l'impact des indicateurs de ressource sur les résultats de l'indice varie et peut jouer un rôle plus ou moins pertinent et interdisciplinaire.

De la même manière, des problématiques environnementales générées dans le cadre des activités primaires restreignent notamment l'aptitude de la région de Cuauhtémoc, qui n'atteint pas les IPE maximum. L'IPE-SIG fait en effet ressortir des enjeux de surexploitation des aquifères, contamination de l'eau, et déforestation qui sont associés aux pratiques agricoles. L'identification de ces problématiques est d'autant plus importante à noter que leur suivi constitue dans l'actualité des enjeux mis en avant sur la scène internationale. La question de l'exploitation des aquifères est signalée ainsi par les organismes internationaux comme un défi de gestion territoriale durable (Richey et al., 2015 ; UN-WWAP, 2015 ; UNESCO-IHP, IGRAC et WWAP, 2012). Deux raisons l'expliquent : premièrement elle est lourde de conséquence et constitue une menace pour la reproduction des sociétés, et deuxièmement son suivi est délicat tant pour les coûts qu'ils représentent que pour ceux des décisions qu'il pourrait impliquer. Il résulte de cela que la surexploitation des aquifères n'est pas systématiquement visible dans les diagnostics interdisciplinaires liés à cette ressource en eau (Vollmer et al., 2016). Les mêmes limites et les mêmes enjeux existent aussi en ce qui concerne les contaminations d'origines agricoles (Bues et al., 2004 ; Finizio et Villa, 2002 ; United Nations, 2017 ; UNSG, 2016).

Tous ces éléments qui distinguent l'IPE-SIG de l'IDH confirment sa pertinence dans le cadre d'une collaboration indirecte avec les autorités publiques pour diagnostiquer la pauvreté en eau de manière interdisciplinaire. Deux éléments favorisent cette pertinence. Tout d'abord, l'utilisation d'indicateurs hydrologiques et environnementaux spécifiques y est intéressante. C'est d'ailleurs ce que suggèrent Anju et al. (2017) et ce que font Cullis et Gorgens (2006) à travers le *water poverty mapping* mais aussi Forouzani et Karami (2011) dans sa perspective spécifiquement agricole. Ces études dessinent une ligne directrice pour la construction des indicateurs, néanmoins ils simplifient les composantes au point de les réduire à un seul indicateur et ne discutent pas cette démarche (Section 1.3.1). La discussion est donc amorcée dans la présente étude qui tend à préciser et discuter les choix méthodologique en fonction des orientations analytiques, comme le recommandent Vollmer et al. (2016). Dans ce sens, l'utilisation d'indicateurs cartographique est surtout intéressante dans le cadre d'analyses cartographiques développées sur des pixels. En effet, les variations environnementales couvrent principalement des aires locales, tandis que les variations hydrologiques ont avant tout des impacts régionaux (Section 3.2.2). En

somme, l'échelle municipale ne leur confère pas une place optimale, et ce d'autant plus que les aptitudes observées dans ces entités administratives posent aussi question.

Les variations IPE-SIG qui apparaissent entre les municipalités de l'Etat de Chihuahua les caractérisent en termes socio-économiques et infrastructurels. La comparaison de l'IPE avec l'IDH met en avant le fait que les indicateurs d'accès, d'usage et de qualité de l'eau ne suivent pas systématiquement les résultats de l'IDH (Section 3.2.1). Leurs spécificités sont surtout visibles dans la municipalité de Chihuahua dont les fortes capacités sont nuancées par l'usage public, et la qualité chimique de l'eau. Cela témoigne des apports de l'IPE par rapport à l'IDH face à la spécificité des problématiques de pauvreté en eau. Cependant ces commentaires insistent aussi sur la trop faible visibilité des facteurs qui singularisent l'IPE et le rendre pertinent. De fait, la comparaison de l'IPE-SIG avec l'IDH et avec les cartes d'indicateurs (ou de composantes) apporte des éléments d'interprétations intéressants qui ne sont pas directement accessibles dans l'analyse isolée de l'indice. Cela interroge la clarté et l'univocité de l'IPE-SIG.

- Visibilité et représentativité de l'IPE-SIG : unité de calcul et interprétations cartographiques

L'IPE-SIG municipal permet de synthétiser l'imbrication complexe de 18 facteurs influençant la pauvreté en eau. Mais sous sa forme cartographique, la distinction des différents types de pauvreté en eau reste délicate, et des confusions sont possibles. Cette limite n'est pas propre à l'IPE-SIG : elle constitue une discussion centrale en ce qui concerne non seulement les résultats statistiques de l'IPE mais aussi tous les indices (Anju et al., 2017 ; OECD et JRC, 2008). Les questions qui se posent à ce sujet sont celles de la représentativité territoriale mais aussi de l'univocité des cartes de résultats.

L'IPE-SIG est élaboré pour les entités géométriques que sont les pixels. Cette échelle de calcul adapte la suggestion d'Abraham et al. (2002) à l'échelle régionale, en augmentant la représentativité territoriale des résultats par la sélection d'unités de calcul plus homogènes que les entités administratives. A travers les cartes raster, l'IPE valorise plusieurs échelles de données et attribue aux indicateurs hydrologiques et environnementaux des délimitations spatiales spécifiques. Cette alternative évite de transformer ces indicateurs afin d'en extraire un état des lieux uniforme pour l'ensemble du territoire municipal, comme le font les études de *water poverty mapping* (Section 1.3.1). A ce titre, l'IPE-SIG augmente la précision

de l'indice et constitue un apport intéressant pour augmenter la sensibilité du diagnostic aux facteurs hydrologiques et environnementaux. En revanche, le fait que les résultats y soient sensibles ne signifie pas nécessairement que leur identification soit aisée.

Grâce aux pixels, les cartes raster offrent en théorie la possibilité d'identifier les enjeux et les territoires grâce à leur localisation et à leurs délimitations (Section 1.4.2). Mais dans le cas de l'IPE, 18 indicateurs sont agrégés et associent 7 formes : cette configuration constitue un problème en ce que l'identification de toutes les formes n'est pas aisée. En l'occurrence, deux formes se démarquent notablement des entités municipales sur la carte d'IPE-SIG (Section 3.2.2) :

- ✓ des ombres, étendues et diffuses ;
- ✓ et des taches, plus restreintes et plus marquées.

Celles-ci correspondent à des dynamiques régionales (surtout le contexte hydrologique) mais aussi à des problématiques locales (l'exploitation des aquifères, la contamination agricole, la déforestation et l'érosion). Globalement il est apparu que les taches signalent des problématiques locales, tandis que les ombres signalent des problématiques régionales. Néanmoins, cette distinction n'est pas toujours évidente : les aquifères en particulier adoptant des formes mixtes. En outre, si les territoires agricoles sont identifiables à partir d'une connaissance globale du territoire (étant donné son impact sur celui-ci), les délimitations associées à l'érosion, au climat ou aux aquifères sont plus spécifiques et méconnues. Leur diversité et leurs juxtapositions dans les résultats finaux les rendent d'autant plus difficiles à identifier sans le recours aux cartes d'indicateurs. A cela vient aussi s'ajouter un autre problème associé à l'univocité des résultats. Il concerne à la fois les territoires agricoles et les délimitations municipales. En effet, certains espaces agricoles posent seulement question en termes de contamination (soulignée par Q2), mais d'autres sont aussi issus de processus de déforestations (et apparaissent donc à travers M2). Pour détecter les problématiques associées à ces espaces il convient par conséquent de faire appel aux cartes d'indicateurs (ou de composantes). De la même façon, les délimitations municipales traduisent des variations relatives aux dix indicateurs d'accès, de capacité et d'usage, mais aussi à deux indicateurs de qualité de l'eau (Q1 et Q3). De plus, la délimitation des aptitudes relatives à la composante de ressource est parfois difficile, de telle sorte que certaines variations observées entre différentes municipalités peuvent aussi s'expliquer par les indicateurs de cette composante. La définition précise des enjeux associés à chaque territoire nécessitent d'étudier les cartes d'indicateurs (ou de composantes).

Cette double limite de clarté implique que l'analyse de l'IPE-SIG gagne à être complétée par l'analyse d'autres cartes : des cartes d'indicateurs, de composante, voire même (dans le cas présent) la carte de l'IDH. C'est une limite importante pour un outil de diagnostic comme l'IPE, dont l'objectif est l'identification des facteurs de pauvreté en eau pour aider la prise de décision. Cette limite n'est pas propre à l'IPE-SIG : elle affecte aussi les résultats obtenus en calculant l'IPE à partir d'approches statistiques (Section 1.2.3). Plus généralement, les problèmes de confusion font partie intégrante des calculs d'indices (OECD et JRC, 2008) et des modélisations cartographiques (Section 3.3.2). Malgré elles, ces outils sont utiles et favorisent les négociations territoriales. Dans ce contexte, l'IPE-SIG comporte quelques opportunités. Tout d'abord, il distingue les trois entités territoriales qui forment l'Etat de Chihuahua : les corridors de développement se singularisent par leurs scores relativement élevés, et le désert et la Sierra se dessinent de manière plus ou moins continue grâce à leurs aptitudes inférieures (la Sierra surtout crée une tendance régionale claire). Ensuite, les facteurs socio-économiques et structurels expliquent la majeure partie des variations municipales observables dans ces ensembles. Au contraire, les facteurs hydrologiques et environnementaux sont identifiés à travers des variations intra-municipales. Les plus visibles correspondent aux problématiques les plus fortes : à ce titre elles sont les plus importantes et, par extension, les plus faciles à reconnaître. Comme le disent Sullivan et al. (2002) l'objectif n'est pas de créer la surprise mais de produire une synthèse favorisant les discussions. Dès lors, même si elles sont connues, l'apparition de ces problématiques dans les résultats finaux est intéressante puisqu'elle favorise l'aide à la prise de décision. D'ailleurs, l'IPE-SIG permet d'alimenter la négociation territoriale à deux échelles :

- ✓ celle de l'Etat, en attirant l'attention sur certaines problématiques, mais surtout sur certaines municipalités et sur certaines régions ;
- ✓ celle des municipalités, en détectant les plus fortes problématiques hydrologiques et environnementales (Section 3.4).

Finalement, l'IPE-SIG municipal met en évidence l'impact positif du développement sur la pauvreté en eau tout en apportant des nuances d'ordre hydrologiques et environnementales. Les outils cartographiques d'avèrent à ce titre intéressant pour construire un diagnostic qui alimente des discussions aussi diverses que celles qui concernent la normalisation des indicateurs, la pertinence des données publiques mais aussi l'interdisciplinarité et la clarté des résultats. En revanche, tous les choix méthodologiques adoptés peuvent être discutés, et la représentation finale de l'IPE pourrait être encore

améliorée dans le sens de la clarté (Section 3.3.2). D'ailleurs, l'IPE-SIG municipal reste relativement concentré autour de la moyenne, ce qui interroge en ce qui concerne la marginalisation de la Sierra, mais aussi et surtout au sujet des dynamiques de désertification qui affectent les territoires semi-arides du désert *chihuahuense* (Quintana, 2009). En parallèle, il différencie seulement deux des trois pauvretés en eau qui caractérisent l'Etat de Chihuahua (Section 2.1.1), et ne permet pas d'interpréter la diversité des contextes socio-économiques : les résultats finaux peuvent seulement être qualifiés d'avantageux ou de désavantageux. A ce sujet, les outils EMC offrent la possibilité de modéliser le diagnostic de telle sorte à faire ressortir des enjeux ruraux et agricoles et donc de diversifier le panorama socio-économique tracé par l'IPE-SIG.

### **3.3 Modélisation de l'IPE dans l'Etat de Chihuahua : tirer parti des alternatives SIG et EMC**

Les résultats de l'IPE-SIG municipal sont compris entre 0,30 et 0,70 pour l'Etat de Chihuahua (Carte 55). Ce faisant la cartographie rend compte d'une pauvreté en eau relativement peu préoccupante (Section 3.2.1). Ce constat doit néanmoins être nuancé sur deux points. Premièrement la concentration des scores autour de la moyenne est critiquable puisqu'elle place au même niveau les territoires qui ont des aptitudes moyennes pour toutes les dimensions de pauvreté en eau, et ceux où de faibles aptitudes pour une dimension sont compensées par de fortes aptitudes dans un autre domaine (Garriga et Foguet, 2010a). Une autre limite réside dans le fait que l'IPE-SIG municipal ne fait pas de distinction entre les espaces urbains et ruraux et qu'il caractérise seulement les espaces agricoles en fonction de la contamination de la ressource. Or, les problématiques associées aux milieux ruraux et agricoles sont soulignées par les SDG comme des enjeux importants de la gestion territoriale et des nœuds au cœur de la négociation avec les autorités publiques (Section 1.1.1). Deux alternatives de calcul sont appliquées à l'IPE-SIG pour rendre visibles des facteurs problématiques dans les résultats finaux, et détecter en particulier les enjeux associés aux espaces ruraux et agricoles. Dans cette section les résultats obtenus en spatialisant l'IPE-SIG mais aussi en utilisant une méthode d'agrégation OWA sont discutés en fonction de leur représentativité territoriale.

### 3.3.1 *Visibilité des enjeux de gestion dans la modélisation l'IPE dans l'Etat de Chihuahua*

La spatialisation de l'IPE est obtenue en identifiant les aires urbaines, rurales, agricoles et non-agricoles sur les cinq cartes d'indicateurs correspondant (Section 2.4.2). En l'occurrence, pour U2 (indicateur d'usage agricole) seule la spatialisation change. Les valeurs municipales sont strictement attribuées aux surfaces agricoles, et (comme pour l'indicateur de contamination agricole Q2) le reste du territoire obtient une aptitude neutre de 0,5 (Annexe 1). En ce qui concerne A1 (indicateur d'accès à l'irrigation), il faut remarquer qu'une même municipalité peut associer des aires agricoles irriguées et non irriguées. Au moment de spatialiser l'indicateur, les surfaces d'agricultures saisonnières signalées dans la carte d'USV ont donc été conservées comme telles, tandis que les valeurs déterminées de manière statistiques ont été exclusivement attribuées aux surfaces dites irriguées (Annexe 1). Dans ce deuxième cas aussi les territoires non agricoles ont des aptitudes proches de 0,5. Pour les trois indicateurs d'accès et de capacité avec des données disponibles à l'échelle locale (A2, A3 et C2), la situation est différente. Les aptitudes urbaines sont représentées sur les aires urbaines, tandis que les aptitudes rurales le sont sur les aires rurales. De ce fait, les villes adoptent la forme de taches au sein des entités municipales rurales (Annexe 1).

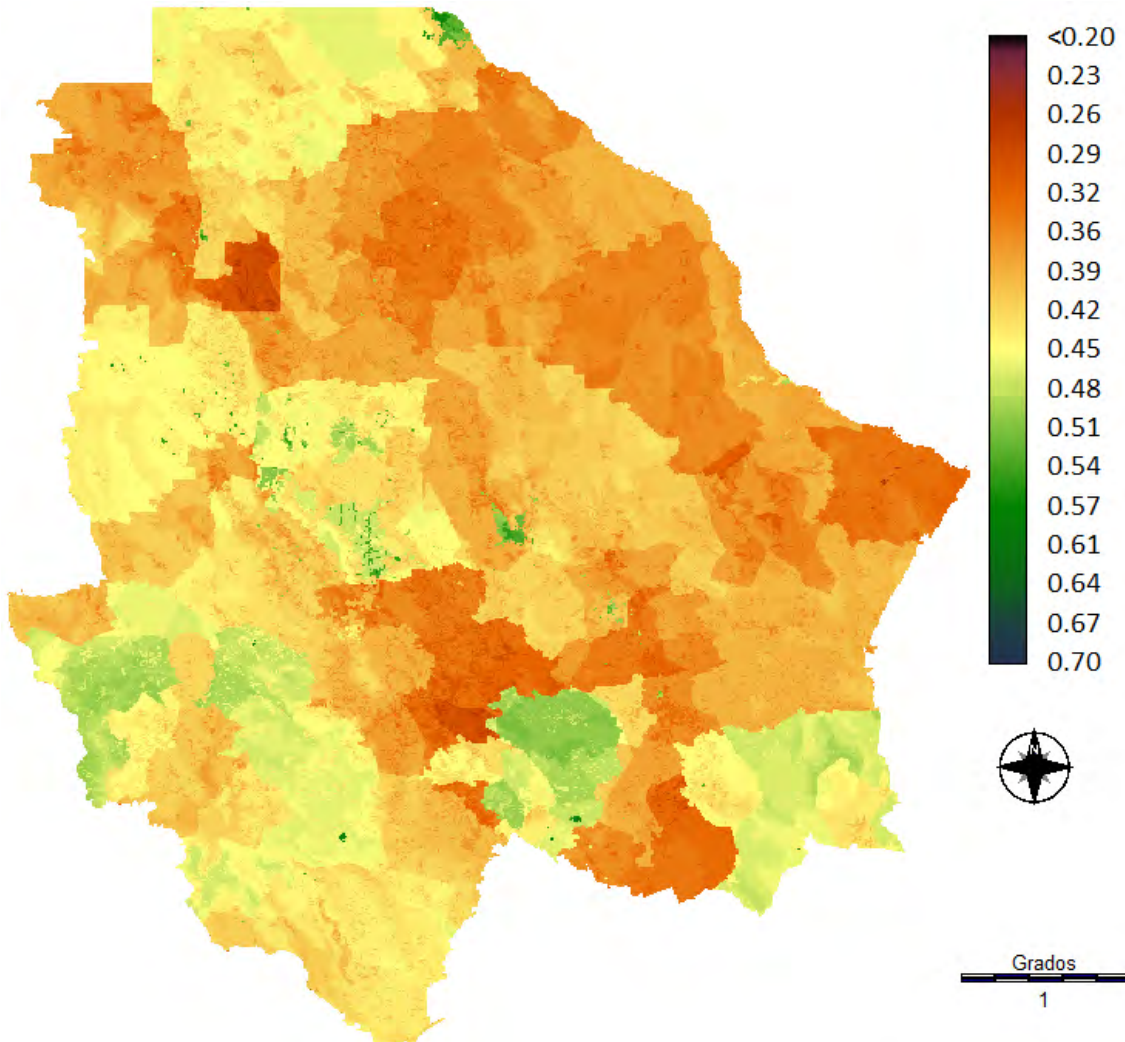
Les aptitudes de ces entités interagissent avec celles des autres indicateurs et forment un IPE-spatialisé dont les interprétations diffèrent de l'IPE-SIG municipal. Ces résultats sont présentement analysés, mais aussi comparés avec les précédents. En outre, les cartes d'indicateurs spatialisées sont aussi employées pour construire l'IPE-OWA, qui adapte les opérations d'agrégation (Section 2.4.2) et engendre encore d'autres résultats.

- Résultats de l'IPE-spatialisé

L'IPE-spatialisé de l'Etat de Chihuahua est compris entre 0,26 et 0,60 (Carte 60). Comme l'IPE-SIG municipal, il est donc proche de la moyenne. Mais la majeure partie du territoire présente cette fois des scores inférieurs ou égaux à 0,48 ce qui témoigne, en l'occurrence, d'une situation préoccupante (Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Maheswari et al., 2017). De fait, les aptitudes supérieures à 0,55 sont très

localisées, et ne dépassent pas 0,60. Les exceptions les plus visibles correspondent aux mégapoles de Chihuahua et Juárez ainsi qu'à des aires agricoles situées dans la région de Cuauhtémoc.

Les territoires qui se démarquent par des aptitudes supérieures à 0,47 correspondent en grande partie aux espaces urbains. Les deux mégapoles (Chihuahua et Juárez) sont particulièrement reconnaissables, mais toutes les grandes villes de l'Etat ainsi que les villes secondaires telles que Guachochi, et San Juanito apparaissent sans exception. Au contraire, seules quelques municipalités obtiennent des scores équivalents. Il s'agit de municipalités minières (Parral et Uruachi) ainsi que la municipalité de Jiménez, caractérisée par des activités minières ainsi qu'une singulière production de noix de pécan. Autrement dit, l'IPE-spatialisé fait ressortir les pôles de développement, dont la capacité et les infrastructures réduisent la pauvreté en eau.



Carte 60 : Résultats de l'IPE-SIG spatialisé



Les pôles urbains apparaissent de manières très localisées, tandis que les pôles économiques sont transcrits sur des espaces plus vastes correspondant à tout ou partie des territoires municipaux correspondant. A ce sujet peu d'entre eux tracent effectivement les contours des aires agricoles ; et les indicateurs de ressource et d'environnement s'associent aux aptitudes socio-économiques de telle sorte que les aptitudes supérieures à 0,48 ne couvrent l'ensemble des territoires municipaux qu'à Parral et dans quelques municipalités de la Sierra (ces cas particuliers sont discutée dans la section 3.3.2).

Malgré le travail de spatialisation plus fine, l'IPE-spatialisé reste principalement interprétable à l'échelle municipale. D'ailleurs, les variations observables entre les territoires urbains suivent majoritairement celles des municipalités. Seules les mégapoles ont des comportements qui les singularisent par rapport au reste des municipalités où elles se trouvent. Cela s'apprécie sur la carte par le fait que l'écart existant entre les scores des milieux urbains et ruraux est plus grand pour les mégapoles (0,25) que pour les autres villes (0,10 à 0,15). Dans ce contexte, quelques différences d'aptitudes sont observables au sein même des aires urbaines. A Chihuahua et à Juárez il est particulièrement visible que les cœurs des mégapoles obtiennent des aptitudes plus hautes que leurs marges. Cela s'explique par la dynamique de croissance urbaine, traduite à travers l'indicateur de dégradation du couvert végétal (M2).

Au contraire (mais comme dans le scénario municipal), la municipalité de Manuel Benavides reçoit des scores particulièrement bas (inférieurs à 0,33). Seulement cette fois, d'autres municipalités recensent des IPE qui lui sont équivalents voire inférieurs : il s'agit de Galaena (au nord ouest), mais aussi de quelques municipalités situées dans le sud de l'état (nommément Nonoava, Satevo et El Tule à l'ouest de Parral, et Lopez et Coronado à l'ouest de Jiménez). Comme elle, ces municipalités ne comprennent pas de villes de plus de 2 500 habitants (Annexe 1). Et comme elle, elles sont affectées par une pauvreté en eau multi-dimensionnelle. Elles concentrent en l'occurrence des aptitudes problématiques en ce qui concerne les indicateurs d'accès, d'usage mais aussi de climat et de sur-exploitation de la ressource souterraine. A ce sujet, il est notable que ces aptitudes sont plus basses que celles de la Sierra.

D'ailleurs, même dans les corridors de développement, la majorité des aptitudes sont plus basses que celle de la Sierra. Dans cette entité, les faibles aptitudes associées aux indicateurs socio-économiques sont nuancées par un contexte physique favorable. Au contraire, dans le reste du territoire en dehors des pôles, les problématiques de capacité et d'accès associées aux milieux ruraux s'associent au contexte semi-aride et aux dégradations environnementales. C'est ce qui explique les faibles aptitudes dans ces

territoires. Dans ce contexte, les aquifères précédemment signalés dans les régions de Delicias et d'Ojinaga se démarquent aussi négativement sur la carte de l'IPE-spatialisé.

Pour finir, il convient de remarquer que les espaces agricoles sont rarement visibles dans cette carte spatialisant pourtant les indicateurs socio-économiques de manière à les faire ressortir. De fait, seules quelques surfaces agricoles situées dans la région de Cuauhtémoc se démarquent positivement du reste des municipalités correspondantes. Les autres surfaces agricoles qui sont visibles (bien que plus légèrement) dans l'IPE-spatialisé se caractérisent par des scores plus faibles que le reste des territoires municipaux. Dans les deux cas, il s'agit exclusivement de surfaces irriguées, dont les aptitudes sont (par définition) plus ou moins positives en termes d'accès et d'usage. De fait, une compensation s'opère entre les faibles aptitudes associées à l'indicateur de contamination agricole, et les aptitudes d'usage (hautes) et d'accès (variables) :

- ✓ lorsque les surfaces agricoles se distinguent positivement, c'est que les aptitudes d'usage et d'accès l'emportent sur celles de contamination ;
- ✓ lorsqu'elles se distinguent négativement c'est le contraire ;
- ✓ et lorsqu'elles n'apparaissent pas c'est que les aptitudes hautes et basses se neutralisent.

En somme, l'IPE-spatialisé met en évidence l'impact positif de certains pôles de développement sur la pauvreté en eau, tout en révélant des enjeux spécifiques aux territoires ruraux. Cela, en plus de considérations hydrologiques et environnementales qui ont déjà été mentionnées dans l'IPE-SIG municipal (Section 3.2.2). Pour comprendre l'impact complexe de la spatialisation sur les résultats, la section suivante compare les deux alternatives de calcul.

- Comparaison des IPE-SIG municipaux et spatialisés

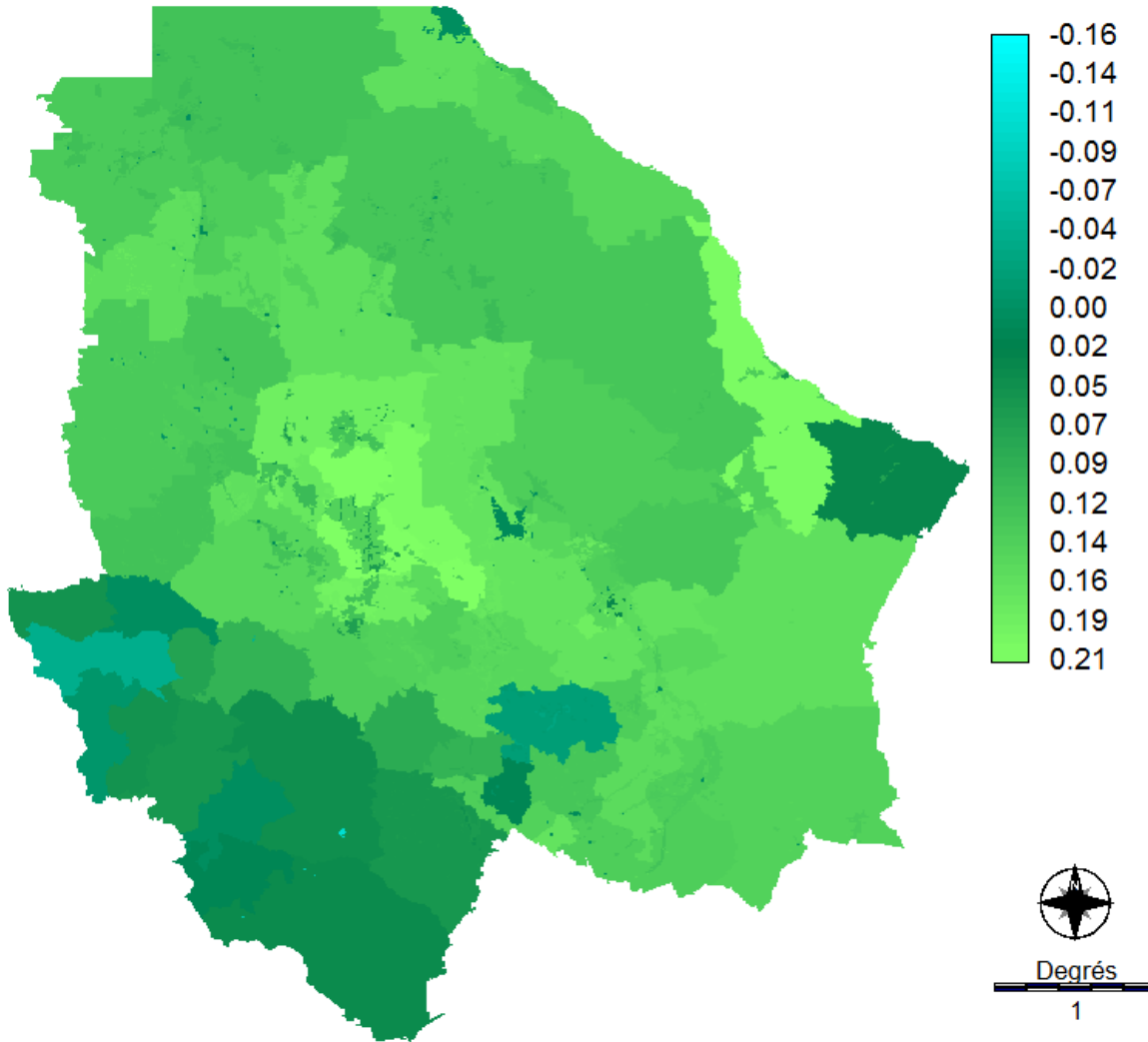
La Carte 61 synthétise les différences qui existent entre l'IPE-SIG municipal et l'IPE-spatialisé, aussi appelés respectivement scénarios 1 et 2. Elle est obtenue en soustrayant l'IPE-spatialisé à l'IPE-SIG municipal. Par conséquent, lorsque les scores sont positifs les aptitudes municipales sont supérieures aux aptitudes spatialisées ; et lorsque les scores sont négatifs c'est le contraire. Les scores proches de zéro indiquent quant à eux que les deux scénarios se ressemblent. A première vue, la carte trace deux tendances :

- ✓ dans les déserts, les villes ont des scores positifs, proches de 0, et le reste du territoire obtient principalement des scores élevés ;
- ✓ dans la sierra, les villes présentent principalement des scores négatifs tandis que le reste du territoire obtient des scores proches de 0 et même ponctuellement négatifs.

En outre, quelques aires agricoles sont visibles alors que la majorité ne l'est pas.

De fait, les villes ont des aptitudes plus élevées que celles des territoires ruraux pour les trois indicateurs d'accès et de capacité qui sont spatialisés (Annexe 1). Ces fortes aptitudes impactent positivement les moyennes municipales dans le scénario 1, alors que dans le scénario 2, elles sont (au moins en partie) concentrées sur les aires urbaines. Pour ces trois indicateurs, les territoires ruraux se voient donc attribuer des aptitudes plus faibles dans le scénario 2 que dans le scénario 1.

En ce qui concerne à présent les cartes d'indicateurs agricoles, elles donnent lieu à des diagnostics hétérogènes. La carte d'usage agricole attribue de fortes aptitudes à tout l'Etat de Chihuahua, pendant que les aptitudes d'accès à l'irrigation sont plus variées mais tendent à être majoritairement faibles (Annexe 1). En spatialisant les indicateurs agricoles, l'aptitude des territoires non agricoles est réduite en termes d'usage (passant d'aptitudes fortes à aptitudes moyennes), mais leurs aptitudes d'accès sont tantôt réduites tantôt augmentées.



**Carte 61 : Soustraction de l'IPE-SIG spatialisé à l'IPE-SIG municipal**

Dans le cadre de l'IPE-spatialisé, l'association de ces deux types d'indicateurs génère trois types de territoires :

- ✓ les territoires urbains (qui sont aussi non agricoles) ;
- ✓ les territoires agricoles (qui sont aussi ruraux) ;
- ✓ et les territoires ruraux non agricoles (qui correspondent aux territoires municipaux qui ne sont ni urbains ni agricoles).

Dans la municipalité de Cuauhtémoc par exemple, la Carte 61 dessine les territoires agricoles et urbains avec des scores respectifs de 0,14 et 0,06. Le reste de la municipalité obtient un score équivalent à la somme des deux, à savoir 0,20. Dans ce cas qui reflète aussi la situation de la municipalité d'Ojinaga,

les territoires urbains concentrent de grandes quantités de population, et l'impact des aptitudes agricoles est très positif dans le scénario spatialisé (aptitudes d'accès optimales). C'est pourquoi en passant du scénario municipal au scénario spatialisé, les territoires ruraux non agricoles accumulent les baisses d'aptitudes associées aux quatre indicateurs spatialisés. C'est ce qui explique leur score particulièrement fort dans la Carte 61. En revanche, les surfaces urbaines recensent uniquement les baisses d'aptitudes concernant les indicateurs agricoles : les aptitudes associées aux trois indicateurs sont pour leur part augmentées dans le second scénario. Ces variations contraires, qui se neutralisent, permettent de comprendre que leurs scores soient plus proches de zéro que le reste du territoire. Enfin, les aptitudes des surfaces agricoles baissent avec les indicateurs d'accès et de capacités rurales, tandis qu'elles sont stables dans le cas des indicateurs agricoles. La baisse qui résulte de cela étant moins forte que celle des territoires ruraux non agricoles, mais plus forte que celle des surfaces urbaines, elle explique les scores intermédiaires représentés sur les surfaces agricoles dans la Carte 61.

Les autres municipalités situées dans le désert et dans les corridors de développement recensent des scores moins forts que ceux de Cuauhtémoc et Ojinaga, même s'ils restent majoritairement supérieurs à 0,1. Dans leurs cas, les aptitudes rurales suivent des évolutions similaires à celles qui ont été précédemment commentées, mais les aptitudes associées aux indicateurs agricoles varient d'autres façons. En effet, l'accès à l'irrigation génère des aptitudes moyennes ou faibles dans le scénario municipal, lesquelles sont donc maintenues ou augmentées dans le scénario spatialisé. C'est pourquoi, dans ces municipalités les surfaces agricoles se distinguent par des scores qui sont à peine plus faibles que le reste du territoire municipal.

La Sierra obtient, pour sa part, des scores inférieurs à 0,06 et qui reflètent majoritairement des différences moins fortes entre les deux scénarios. Sur ce territoire, plusieurs municipalités de la Sierra (ainsi que Manuel Benavides) ne comprennent pas de ville (de plus 2 500 habitants). Dès lors, seuls les indicateurs d'accès et d'usage agricole génèrent en théorie des variations entre les deux IPE. Or, une compensation s'opère entre les hautes aptitudes d'usage agricole et les faibles aptitudes d'accès à l'irrigation. Cette compensation neutralise leur influence dans le scénario 2 : elle explique le fait que l'IPE des aires agricoles ne change presque pas entre les deux cartes (et que la carte ne les fasse donc pas apparaître). Cela justifie leurs scores particulièrement proches de 0 dans la Carte 61, scores qui devraient d'ailleurs théoriquement être nuls (ce point de discussion est développé dans la Section 3.3.2).

Dans le cas des municipalités avec des centres urbains de plus de 2 500 habitants, l'explication des variations existant entre les deux scénarios n'est pas la même. En l'occurrence les centres urbains impactent les moyennes municipales comme dans le cas de Cuauhtémoc. Mais dans les territoires non agricoles, les aptitudes d'accès à l'irrigation passent de 0 dans le scénario municipal (aptitude associée à l'agriculture saisonnière) à 0,5 dans le scénario spatialisé (aptitude associée aux territoires non agricoles). Dans la Carte 61 les scores proches de 0 observés dans les territoires ruraux non agricoles s'expliquent alors par l'association d'une réduction des aptitudes rurales et d'une augmentation des aptitudes associées à l'indicateur d'accès à l'irrigation. Et dans les villes, les scores négatifs s'expliquent par la double réduction des aptitudes rurales et d'accès à l'irrigation.

Restent enfin les cas de Parral et Uruachi dont l'ensemble des territoires municipaux recensent des scores légèrement négatifs, respectivement -0,01 et -0,04. Le fait est que la Carte 61 signale quelques territoires agricoles à Parral mais pas à Uruachi, en outre Parral comprend une ville de 2 500 habitants alors que ce n'est pas le cas d'Uruachi. Ces dissemblances limitent les possibilités de rapprochement et d'interprétation possible des scores conjointement négatifs de ces deux municipalités. Les questions que ces deux cas soulèvent, tout comme le fait que des scores différents soient enregistrés dans des municipalités qui n'ont pas de villes et qui ne présentent pas de variation des aptitudes agricoles entre les deux scénarios, sont traitées dans le cadre de la discussion de la modélisation de l'IPE (Section 3.3.2).

Au vu de ces commentaires, il faut conclure que la majeure partie des variations observées dans le scénario 2 correspond à celles du scénario 1. Pourtant le scénario 2 présente l'avantage de donner à voir certains enjeux agricoles au sein des territoires municipaux. En parallèle il met aussi en évidence l'intérêt des infrastructures urbaines dans la mitigation de la pauvreté en eau. En revanche, il est notable que dans les deux scénarios, de fortes aptitudes compensent les aptitudes plus problématiques et les faire disparaître. Or il est possible de réduire ce phénomène de compensation : le point suivant considère justement les résultats obtenus en appliquant une méthode OWA.

- Quand la compensation change la donne

L'IPE-OWA de l'Etat de Chihuahua est compris entre 0,49 et 0,11 (Carte 62). Bien qu'inférieurs à la moyenne, ces résultats ne correspondent pas à un diagnostic plus alarmiste que les précédents. Engendrés par la stratégie « pessimiste » adoptée pour l'opération OWA (Section 2.4.2), les scores obtenus ne sont pas directement comparables avec ceux des IPE municipaux et spatialisés<sup>180</sup>. Malgré cela, en analysant la visibilité des différents enjeux, et leur hiérarchisation respective dans ce troisième scénario, il est possible de discuter le contenu de ces divers diagnostics. A ce sujet, les scores obtenus pour l'IPE-OWA à Chihuahua sont concentrés entre 0,20 et 0,35. Rares sont les territoires qui recensent un résultat supérieur ou égal à 0,35, et inférieur ou égal à 0,20 (ces derniers sont indiqués en noir sur la carte). Pourtant, deux entités territoriales se dessinent : signalant plus négativement les territoires désertiques (Coyame del Sotol, Manuel Benavides et Galeana) que le reste de l'état.

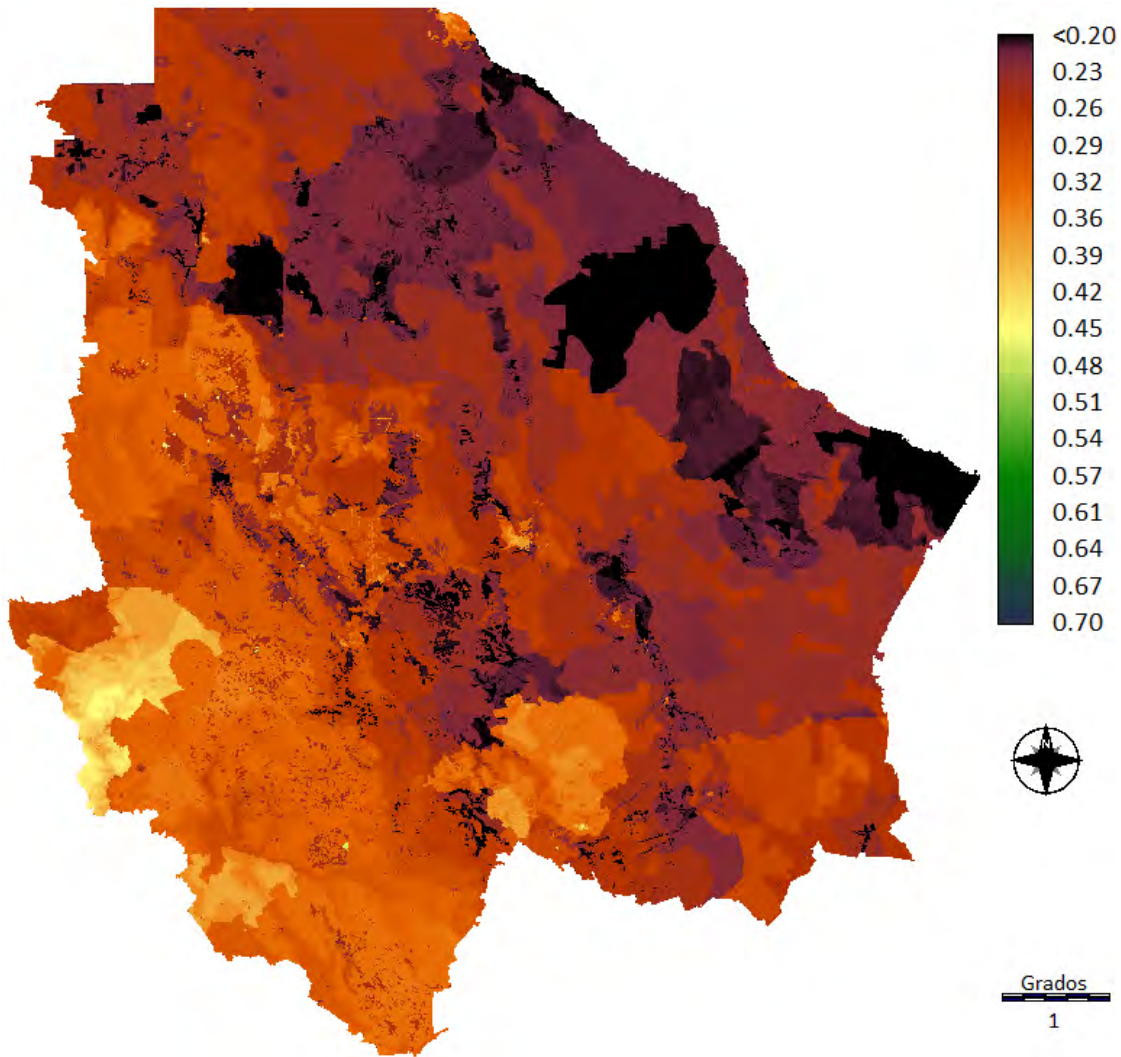
**Sur l'est de la carte, les problèmes de ressource expliquent les délimitations prédominantes dans le désert.**

**Concrètement, la**

Carte 62 fait ressortir des faibles aptitudes dans certaines municipalités qui se démarquaient déjà négativement dans les deux scénarios 1 et 2. Ce faisant, elle permet d'identifier les territoires dont la pauvreté est à la fois extrême et pluridimensionnelle. Ainsi Galanea, qui est située à l'extrémité nord-ouest du désert, reçoit-elle des aptitudes particulièrement faibles (inférieures à 0,20). Et deux autres municipalités recensent de vastes territoires avec des scores inférieurs à 0,21 : il s'agit de Manuel Benavides et de Coyame del Sotol. En outre, même dans le contexte des problématiques de ressources associées au désert, l'IPE-OWA insiste sur les enjeux de surexploitation des aquifères qui avaient été mentionnés dans les deux autres scénarios. L'indicateur de surexploitation des aquifères influence ainsi clairement le sud d'Ojinaga dans les trois diagnostics, puisque les tâches sombres correspondant à l'aquifère sont identifiables sur les trois cartes. La région qui avait été signalée négativement par les scénarios 1 et 2 entre Delicias et Jiménez est également visible dans l'IPE-OWA, même si elle se démarque moins clairement que celle d'Ojinaga.

---

<sup>180</sup> L'IPE-OWA compare les enjeux les plus problématiques entre eux, alors que les deux autres scénarios comparent exclusivement les territoires.



**Carte 62 : IPE-OWA**

Dans l'ouest de la Carte 62 des délimitations municipales ressortent clairement. Dans le Sud de la Sierra elles sont d'ailleurs relativement prédominantes. Elles indiquent une pauvreté essentiellement d'ordre socio-économique. Néanmoins, le fait que ce territoire recense les plus hauts IPE-OWA de l'état (de 0,30 à 0,49) indique que les problématiques – principalement d'accès et de capacité – observées dans la Sierra restent moins inquiétantes que les enjeux de ressource qui existent dans le reste de l'état. Ces scores sont d'ailleurs supérieurs aux pôles d'activités urbains et municipaux qui constituent les corridors de développement.



L'ensemble des pôles de développement qui se distinguaient positivement dans les scénarios 1 et 2, sont fortement impactés par les indicateurs de ressource ou d'environnement. Avec cette limite, les municipalités qui forment la région de Cuauhtémoc ainsi que celle de Jiménez, et le duo que forment Juárez et Asención, se caractérisent par de légères hausses de l'IPE-OWA comparativement aux ensembles régionaux désertiques où elles se situent. Ces hausses (qui sont fondées sur des conjonctures particulièrement favorables du point de vue socio-économique) font apparaître les délimitations des entités municipales correspondantes. De la même manière, dans l'ensemble du territoire de Chihuahua, les villes se singularisent à partir d'aptitudes supérieures aux territoires ruraux correspondant. Dans le désert Juárez, Chihuahua et Delicias prennent la forme de taches jaune orangées ; mais c'est aussi le cas des villes plus secondaires comme Jiménez. Dans les territoires moins arides, les villes comme Parral ou Guachochi prennent une couleur jaune. Même Ojinaga est identifiable dans le désert, bien que moins vivement. Ces scores donnent à voir que les infrastructures urbaines nuancent les problématiques régionales. Cependant, la stratégie OWA pessimiste évite qu'elles s'en affranchissent autant qu'en appliquant une moyenne pondérée. Il reste à noter que Parral et les municipalités qui lui sont limitrophes (à l'ouest), concentrent les plus hautes aptitudes des corridors de développement. Cela s'explique tant par les fortes aptitudes socio-économiques de ces municipalités (discutées dans la section 3.3.2) que par leurs fortes aptitudes environnementales (elles échappent en particulier aux problématiques de surexploitation des aquifères qui affectent Jiménez).

Pour finir, l'IPE-OWA donne à voir des enjeux agricoles dans toutes les régions qui composent l'Etat. Ils se démarquent essentiellement sous la forme de tâches plus ou moins sombres sur le territoire. Dès lors, le scénario 3 insiste plus encore que le scénario 2 sur les problématiques agricoles puisque les infrastructures et les usages agricoles parvenant à mitiger la pauvreté en eau sont rares. Concrètement, les enjeux d'accès à l'irrigation et de pollution de la ressource s'associent de plusieurs façons dans la Carte 62. Dans leur ensemble, les IPE des aires d'agriculture temporaire sont compris entre 0,21 et 0,25 : le contexte municipal semble donc moins impactant sur ces territoires que les problématiques de contamination et/ou d'accès à l'irrigation. En revanche les scores attribués à l'agriculture irriguée varient d'une municipalité à l'autre : allant de 0,14 à 0,33. A ce sujet, il est notable que les aires agricoles de la région de Cuauhtémoc font exception avec un score de 0,33, et ce alors que l'IPE-SIG municipal est de 0,30. De fait, comme dans le scénario 2, les hauts niveaux de technification de l'agriculture y nuancent la problématique environnementale au point de réduire la pauvreté en eau de

cette région agricole. Cela permet de conclure que les variations observées en ce qui concerne les territoires agricoles ne sont pas exclusivement dues aux contextes municipaux.

### 3.3.2 *Discussions : Apports et défis de la modélisation spatialisée de l'IPE*

Des discussions ont été entamées au sujet des échelles de calcul et des méthodes d'agrégation de l'IPE afin d'accroître sa représentativité territoriale (Abraham et al., 2002 ; Garriga et Foguet, 2010a). Cependant, elles n'intégraient pas directement les outils SIG, bien que ceux-ci servent aussi à l'aide à la prise décision et à la construction d'indices (Joerin et Musy, 2000). Dans ce contexte, la présente étude a non seulement valorisé des données cartographiques pour construire l'IPE (et adopté une méthode de standardisation « *FUZZY* » afin de préserver la richesse des indicateurs correspondant), mais elle a aussi appliqué différentes alternatives de spatialisation et de compensation autorisées par les outils SIG. Les alternatives méthodologiques qui ont été adoptées visaient en particulier à faire ressortir les pauvretés en eau spécifiques des milieux ruraux et agricoles. C'est en associant les conclusions portant sur les trois résultats de l'IPE-SIG (IPE dit municipal, IPE-spatialisé et IPE-OWA) que les apports et les défis de la modélisation sont discutés en fonction de leur capacité à mettre en évidence les enjeux de pauvreté en eau de l'Etat de Chihuahua.

- Modélisation et visibilité des pauvretés en eau rurales en contexte désertique

Avec l'IPE-SIG municipal, les municipalités comptant sur des pôles de développement obtiennent des IPE plus forts que celles qui n'en ont pas. Cependant les scores des territoires plus marginaux (la Sierra et le désert) restaient proches de 0,5, indiquant de ce fait une pauvreté en eau relativement moyenne. L'IPE-spatialisé change l'impact des pôles de développement sur l'IPE et confère des aptitudes faibles à certains espaces ruraux dont la pauvreté en eau peut être qualifiée de pluridimensionnelle.

Le panorama généré en spatialisant les indicateurs socio-économiques comprend de fait des différences mais aussi des points communs avec l'IPE-SIG municipal (Carte 61). Les scores observés dans la Sierra restent à peu près stables dans les deux cartes, ce qui est cohérent avec le fait qu'elles intègrent peu de

pôles de développement. De plus, dans les corridors de développement les deux diagnostics signalent les mêmes pôles de développement. Mais si plusieurs municipalités se démarquent avec des aptitudes moyennes dans l'IPE-spatialisé, peu d'entre elles atteignent des aptitudes fortes. Celles-ci se concentrent particulièrement dans les villes et les parcelles agricoles, et laissent voir la pauvreté en eau des espaces ruraux (Carte 60). De fait, les faibles aptitudes du désert (défini aux niveaux écosystémiques mais aussi social et économique) transcendent les limites municipales qui le morcelaient dans le scénario municipal. Elles couvrent plus significativement encore les municipalités déjà présentées comme désertiques dans l'IPE-SIG municipal, mais elles s'étendent aussi sur la majeure partie des territoires précédemment inclus dans les corridors de développement.

Parce que l'option spatialisée est aussi employée dans l'IPE-OWA, ce troisième scénario distingue lui aussi les villes positivement en comparaison avec les espaces ruraux. Cette singularisation des aptitudes urbaines et rurales permet d'insister sur l'intérêt des infrastructures urbaines dans la mitigation de la pauvreté, et au contraire sur le caractère défavorisé d'une grande partie des territoires ruraux à Chihuahua. Il s'agit d'une contribution intéressante dans le cadre des diagnostics de pauvreté en eau (Fenwick, 2010 ; Sullivan et al., 2002). Cet apport va d'ailleurs dans le sens des SDG en justifiant des décisions allant dans le sens de développer les capacités et l'accès aux infrastructures en milieu rural (UNSG, 2016). En outre, la mise en exergue des territoires urbains permet d'attirer d'autant plus l'attention sur les dynamiques d'urbanisation. Dans l'IPE-SIG municipal, celles-ci étaient confondues avec les autres dégradations du couvert végétal, alors qu'elles sont nettement visibles dans l'IPE-spatialisé et l'IPE-OWA. Cela constitue aussi un apport intéressant étant donné que l'urbanisation est particulièrement lourde de conséquences en ce qui concerne les différentes dimensions de la pauvreté en eau (Sullivan et al., 2002 ; Vollmer et al., 2016).

Ce double apport comprend certaines limites. La première nuance concerne le fait que les deux diagnostics spatialisés (IPE-spatialisé et IPE-OWA), les variations observées dans la pauvreté en eau des territoires dits urbains et ruraux s'expliquent en partie par des dynamiques municipales. La raison en est notamment le problème de disponibilité des données discuté dans la section 3.1.3. Bien connu depuis la conception même de l'IPE (Sullivan et al., 2003), ce problème prend une dimension particulièrement limitante dans la perspective de spatialisation. De fait, seuls trois indicateurs ont pu être spatialisés de telle sorte à séparer les espaces urbains des espaces ruraux. Ce faisant, les aptitudes dites urbaines et

rurales ne sont en réalité pas totalement distinctes. A cela s'ajoute que certaines incohérences apparaissent lors de la confrontation des données municipales aux locales. Les scores de Parral et d'Uruachi dans la Carte 61 constituant des énigmes au niveau de l'interprétation ; c'est en comparant les données municipales et locales dans ces deux municipalités que le manque de concordance est apparu. Ainsi, dans le cas de Parral, il est apparu que les données locales conféraient les mêmes pourcentages d'accès aux réseaux d'eau aux villes qu'aux territoires ruraux composant la municipalité. Et il en est de même pour l'accès aux réseaux d'assainissement, alors que dans le cas des données d'éducation les scores de ces deux ensembles sont distincts. Cela pourrait être un cas particulier, mais il se trouve aussi que les valeurs correspondant à l'accès à l'eau ne coïncident pas aux deux échelles considérées<sup>181</sup>. Dans le cas d'Uruachi le manque de coïncidence concerne les données de connexion au réseau d'assainissement<sup>182</sup>. Ce second cas est d'autant plus notable que la municipalité ne compte pas de ville de plus de 2 500 habitants, et que l'égalité devrait donc être parfaite. Ces incohérences expliquent la prépondérance de la municipalité de Parral par rapport au reste des corridors de développement. Mais ils mettent surtout cette prépondérance en question, interrogeant du même fait la véracité de l'ensemble des données. Cette question, qui a déjà été soulevée dans le cadre de l'IPE-SIG municipal, est importante à mentionner mais n'empêche pas de poursuivre l'analyse.

A ce stade, c'est en observant les variations intra-municipales de l'Etat que l'IPE-spatialisé semble pertinent pour discuter des enjeux de gestion rurale. Cela réduit la clarté des résultats de l'IPE-spatialisé, comparativement à ceux de l'IPE-SIG municipal. En effet, dans le scénario municipal les variations intra-municipales sont exclusivement hydrologiques et environnementales (Section 3.2.3). Au contraire, en spatialisant les indicateurs socio-économiques, cette univocité disparaît. En conséquence, c'est seulement à partir de la géométrie des formes observées que l'identification des problématiques socio-économiques ou hydrologiques et environnementale est possible. Cela rend nécessaire la connaissance du terrain, et le recours aux cartes d'indicateurs et de composantes. En outre, au niveau intra-municipal, force est de constater que les surfaces rurales obtiennent des aptitudes plus faibles que celles des villes sur l'ensemble de l'Etat. En l'occurrence, les redondances entre indicateurs, mentionnées par la

---

<sup>181</sup> Les pourcentages obtenus à partir des données locales sont dans ce cas supérieurs aux pourcentages municipaux.

<sup>182</sup> Dans ce cas aussi, les pourcentages obtenus à partir des données locales sont dans ce cas supérieurs aux pourcentages municipaux.

littérature spécialisée impactent le diagnostic spatialisé autant que l'IPE-SIG municipal (Section 3.2.3). Et justement, les composantes d'accès et de capacité sont les deux seules composantes dans lesquelles la distinction des territoires urbains et ruraux s'opère. Dès lors, il semble cohérent qu'une tendance unique s'impose dans les résultats. Mais il faut aussi ajouter à cela que l'association des données rurales et urbaines au sein des mêmes indicateurs ne permet pas de comparer chacune de ces entités aussi précisément qu'elles peuvent le mériter. Puisque les tendances d'accès et de capacité des territoires urbains et ruraux sont différentes (UNSG, 2016), peut-être faudrait-il intégrer deux réalités en adoptant deux indicateurs différents, comme le font Sullivan et al. (2002) et Heidecke (2006). Même si elle est intéressante, cette alternative présenterait l'inconvénient de complexifier encore plus le calcul et surtout les résultats l'IPE-spatialisé, lesquels posent déjà question en terme de clarté et d'univocité.

Même si la spatialisation adoptée met en évidence la pauvreté en eau des milieux ruraux, elle soulève aussi plusieurs questions à ce sujet. Ces questions se retrouvent seulement partiellement dans le cas des pauvretés en eau agricoles.

- Modélisation et enjeux de pauvretés en eau agricoles

Dans l'IPE-SIG municipal, la mise en exergue des problématiques de contamination et d'ouverture d'aires agricoles est directe, puisqu'elles sont les seules à générer des délimitations intra-municipales. En revanche, les aptitudes d'accès à l'irrigation et d'usage agricole ne sont identifiables qu'à travers l'étude des cartes d'indicateurs ou de composantes. Avec la spatialisation, l'interprétation des problématiques associées aux territoires agricoles change.

Dans l'IPE-spatialisé, quelques territoires agricoles de l'Etat ont une influence positive sur la pauvreté en eau régionale. Mais en dehors des quelques municipalités concernées, la carte des résultats confirment que des faiblesses compensent les forces de ces territoires productifs (UNSG, 2016). Le fait que plusieurs aires agricoles restent invisibles sur la carte, indique que dans ces territoires la contamination agricole et l'accès à l'irrigation sont telles qu'elles neutralisent les aptitudes positives des usages agricoles. Et dans certains cas dont les aptitudes sont inférieures à celles des territoires ruraux non agricoles, les dynamiques agricoles en viennent même à engendrer une pauvreté en eau. Au vu de ces éléments d'analyse, les cartes d'IPE-spatialisé permettent de définir l'impact des activités agricoles

sur la pauvreté en eau, impact qui peut être positif, négatif ou neutre. Cet apport est important : il confirme qu'en adoptant une méthodologie transcrivant l'hétérogénéité qui caractérise les entités administratives la pertinence et la précision du diagnostic établi par l'IPE sont renforcées (Abraham et al., 2002 ; Fenwick, 2010 ; Heidecke, 2006 ; Sullivan et al., 2006). Dans ce cadre, l'IPE-spatialisé s'avère intéressant ; mais l'IPE-OWA aussi. Ce dernier signale les espaces et les problématiques agricoles comme l'un des principaux enjeux de gestion dans l'état de Chihuahua, ce qui n'était pas le cas dans les deux diagnostics précédents. Les enjeux d'accès à l'irrigation et de pollutions agricoles coexistent sur les aires non irriguées, et leur confèrent des aptitudes minimales. Mais en réduisant la compensation entre les composantes, la question environnementale est aussi transcrite sur les parcelles irriguées, dont les aptitudes sont plus faibles que celles des territoires non agricoles limitrophes. En somme, l'IPE-OWA fait ressortir presque toutes les entités agricoles de l'état, et ce, en décrivant malgré tous des cas de figures distincts.

Cependant, il s'avère que les carences des données affectent particulièrement le diagnostic des pauvretés en eau agricoles. La pertinence de deux (des trois) indicateurs concernant ce domaine d'activité est fortement limitée par les problèmes d'accès aux données (Sections 2.2.3 et 3.1.3). En effet, l'indicateur de contamination agricole est ainsi établi à partir de la seule cartographie des aires agricoles irriguées et non irriguées. Et l'indicateur d'accès à l'irrigation est élaboré à partir de données concernant les unités de production, qui sont ensuite traduites au niveau des municipalités. Ces deux limites réduisent considérablement les possibilités d'analyses (et de comparaisons). En outre, ces lacunes sont d'autant plus notables que certaines études évaluent spécifiquement la pauvreté en eau de ces espaces (Forouzani et Karami, 2011 ; Zarafshani et Saadvandi, 2017). Un *Agricultural Water Poverty Index* (AWPI) a ainsi été mis en place, et plusieurs fois élaboré au moyen d'indicateurs à la fois divers et spécifiques. Cependant, il faut remarquer que les études en question ont été menées à des échelles locales, et qu'elles excluent les pauvretés en eau non agricoles. Les enjeux de calcul associés diffèrent donc de ceux considérés dans cette étude (Sections 1.2.3 et 1.4.1).

Dans ce contexte, les trois IPE-SIG mènent à des conclusions différentes en termes de gestion des problématiques agricoles, mais aussi en termes de gestion territoriale. En effet, la plus ou moins grande visibilité des enjeux ruraux et agricoles change celle des problématiques liées à la ressource et leur mitigation partielle par les aspects socio-économiques. Dans les scénarios municipaux et spatialisés, les

premières ne sont visibles qu'à travers des interprétations intra-municipales, alors que dans le scénario 3 elles passent au contraire au premier plan sur une grande partie du territoire de Chihuahua. Ce faisant, plusieurs stratégies d'action peuvent être définies à travers les trois cartographies proposées.

- Modélisation de l'IPE-SIG pour aider la prise de décision : multiplier les diagnostics grâce aux EMC et préserver sa pertinence

La modélisation de l'IPE a été élaborée en faisant varier l'EMC à deux niveaux : la représentation cartographique des données socio-économiques et la méthode d'agrégation. De fait, les alternatives spatialisées de l'IPE apportent des nuances intéressantes au diagnostic établi par l'IPE-SIG municipal : elles engendrent plusieurs hiérarchisations régionales qui sont toutes pertinentes pour l'Etat de Chihuahua. En l'occurrence, l'IPE-spatialisé distingue plus négativement le désert *chihuahuense* que la Sierra, et ce alors que les pauvretés en eau de ces ensembles ne se démarquaient pas tant dans le scénario municipal. En outre, en considérant le seuil de 0.48 pour différencier les situations de pauvreté en eau *safe or unsafe*<sup>183</sup> (Gong et al., 2017 ; Heidecke, 2006 ; Maheswari et al., 2017), le territoire de l'Etat devient préoccupant dans l'IPE-spatialisé alors qu'il ne l'était pas dans les résultats municipaux. En gardant la même logique les deux résultats reflètent donc des réalités qui sont complémentaires. Autrement dit, en faisant varier l'impact des pôles de développement sur l'IPE, les deux scénarios permettent d'insister sur des problématiques et des territoires différents. Cela constitue une force puisque l'IPE pourrait ainsi argumenter en faveur de plusieurs politiques de gestion territoriales (Joerin et Musy, 2000). De même, l'IPE-OWA constitue une autre alternative d'EMC qui garde encore la logique de l'indice en générant tout de même un diagnostic qui ne ressemble pas en tout point aux deux autres. En insistant sur les problèmes les plus forts pour chaque territoire, la méthode OWA conduit à insister d'autant plus sur la préservation de la ressource (sous toutes ses formes) et, par extension, sur la rationalisation de la consommation de l'eau.

En somme, les trois avatars de l'EMC conservent les mêmes logiques mais ne génèrent pas les mêmes diagnostics car elles ne comparent pas exactement les mêmes choses :

- ✓ l'IPE-SIG municipal compare entre eux des territoires municipaux, dans lesquels s'expriment aussi des facteurs environnementaux et hydrologiques ;

---

<sup>183</sup> "Acceptable ou risquée".

- ✓ l'IPE-spatialisé compare différentes entités territoriales (urbaines, agricoles et rurales et non agricole), qui incluent elles aussi des facteurs environnementaux et hydrologiques ;
- ✓ quant à l'IPE-OWA, il compare entre eux les enjeux les plus problématiques d'un territoire hétérogène des points de vues environnemental, hydrologique et socio-économique.

Chacun des trois résultats obtenus comprend des limites : certaines sont communes (véracité et précision des données...), d'autres s'expriment de manière spécifique dans les trois scénarios (manque de clarté, de représentativité territoriale ou d'univocité...).

Mais malgré ces limites, cette modélisation en trois temps de l'IPE atteint l'objectif fixé, en réalisant un panorama relativement complet des diverses pauvretés en eau de l'Etat de Chihuahua. Ensemble, les trois diagnostics font ressortir plusieurs enjeux de gestion signalés comme important par des organismes tels que les UN (UNSG, 2016), et permettent de mettre en évidence la manière dont ils s'expriment dans les trois entités géographiques de l'état (Section 2.1.1).

Cela confirme ce que Sullivan et al. (2002) avait affirmé, et ce que Heidecke (2006), Abraham et al. (2002) et plus récemment Vollmer et al. (2016) ont répété : les résultats de l'IPE dépendent des choix méthodologiques, lesquels sont opérés en fonction des enjeux fixés pour le calcul. Cette précision augmente l'importance d'une méthode transparente et reproductible tout en ouvrant un vaste champ de possibilités. En effet, comme l'a précisé Sullivan (2002) de nombreuses méthodologies peuvent répondre à ces critères et peuvent de ce fait être utilisées pour calculer l'IPE. Dans ce cadre, les deux adaptations EMC adoptées (spatialiser les indicateurs socio-économiques et faire varier la compensation entre les composantes de l'IPE) s'avèrent certes intéressantes. Mais l'apport le plus intéressant de cette méthodologie réside dans le fait qu'elle étend les possibilités de diagnostics de l'IPE tout en conservant son caractère à la fois synthétique et pluridimensionnel.

La modélisation EMC augmente les alternatives méthodologiques pour le calcul de l'IPE, mais elle permet aussi d'insister aussi sur l'intérêt que comprend la multiplication des diagnostics. Les études de l'IPE multiplient les résultats dans deux perspectives distinctes. Van Der Vyver (2012) ou bien El-gafy (2018) multiplient les diagnostics pour les comparer entre eux et en tirer des conclusions au niveau épistémologique. En revanche, les études menées dans la perspective d'aide à la prise de décision (et non de réflexion épistémologique) n'offrent, pour chaque territoire considéré, qu'un diagnostic dont les résultats sont donnés sous plusieurs formes (Gong et al., 2017 ; Lawrence et al., 2003 ; Maheswari et al., 2017). Dans ce contexte, la multiplication des représentations de l'IPE favorise son interprétation et est



donc employée pour renforcer son univocité et sa clarté (Section 1.2.3). Cependant, dans les approches cartographiques où les EMC trouvent leur origine, les deux perspectives sont souvent associées.

Les études géographiques adoptant une démarche EMC multiplient les diagnostics, ainsi que la forme de leurs résultats, dans l'objectif de faire avancer les débats épistémologiques mais aussi, et surtout, la négociation territoriale (Maestriperi, 2012 ; Prével, et al., 2018 ; William, 2016). Les avantages à cela sont doubles. Tout d'abord, il faut remarquer que les cartes obtenues à partir d'analyses SIG ont l'avantage d'être précises et nuancées. Néanmoins en retour, elles présentent l'inconvénient d'être difficiles à interpréter en dehors des milieux de spécialistes. Comme dans la tradition de l'EMC la diversification des résultats de l'IPE permet de solutionner en partie ces problèmes (Huang et al., 2017 ; Sullivan et Jemmali, 2014). Dans le cas de l'IPE-SIG, l'interprétation des résultats finaux a d'ailleurs été menée en comparant les trois résultats entre eux, et en faisant aussi appel aux cartes d'indicateurs et de composantes (Sections □o, 3.2, 3.3). Déjà cette alternative oriente la collaboration existant entre les sciences et la société vers un échange : les interlocuteurs scientifiques adaptant leurs discours en fonction d'un récepteur qui n'est pas par définition scientifique. Mais, plus encore, la modélisation en est venue à multiplier les méthodes de calcul en considérant le fait que les récepteurs (les membres de la société considérée) ont des profils et des intérêts hétéroclites. Dans ce cadre, la présentation de résultats divers et comparables permet d'alimenter les débats plus ou moins préexistants dans la négociation territoriale. Cela permet de réduire « l'effet de vérité » d'un seul diagnostic (Lascombes et Le Galès, 2005). En adoptant cette démarche, la modélisation de l'IPE-SIG s'inscrit dans une collaboration sciences/société indirecte, mais aussi plurivoque. Et en prenant en compte ses récepteurs, une telle collaboration est théoriquement plus susceptible d'impacter la gestion territoriale à travers des transformations effectives (Albuquerque, 2008 ; Echeverría, 2008 ; Kim, 2000).

Dans cette perspective, la section suivante met en perspective les résultats de l'IPE-SIG avec les discours d'acteurs dans la sous-région de Delicias. L'objectif est de détecter les points d'accord et de désaccord concernant les pauvretés en eau, et de réaliser un diagnostic de vulnérabilité qui soit effectivement plurivoque.

### 3.4 Diagnostics de vulnérabilité dans les municipalités agricoles de la sous-région de Delicias : résultats obtenus en complétant l'IPE-SIG par une analyse des discours

#### 3.4.1 Régulations sociales, fragilités socio-culturelle et institutionnelles face aux pénuries en eau en milieu agricole

Dans la sous-région de Delicias, les UR sont appelées « *Labores Viejas* » par opposition avec les DR qui sont des « *Labores Nuevas* » (P9). Cela traduit le fait que le DR a étendu les frontières agricoles en ouvrant de nouvelles parcelles à l'irrigation. Au moment de la création du DR, la proposition a été faite aux UR de rentrer dans la nouvelle structure : « *No pagaban el agua... En el Distrito hay que pagarla... Claro que no quisieron. Ellos no sabían*<sup>184</sup> » (P4). Cette citation témoigne du fait que les motifs économiques expliquent historiquement la séparation entre DR et UR, mais qu'un changement de contexte a fini par rendre moins pertinente cette décision (cette question est traitée dans le point suivant). Néanmoins si les *Labores Viejas* n'ont pas été incluses dans le DR, les producteurs ont saisi l'opportunité d'étendre leurs surfaces irriguées. C'est pourquoi les mêmes acteurs sont producteurs dans les UR et dans le DR. Or dans ces deux structures, les niveaux et modalités de gestion sont définis de manière similaires mais les ressources diffèrent et génèrent des variations dans la vulnérabilité face aux pénuries en eau.

- Régulations sociales et vulnérabilités sociales dans les systèmes d'acteurs de gestion de l'eau agricole

Les structures administratives observées dans les SRL, dans les Modules et dans les UR prennent des formes associatives classiques : les prises de décisions sont prises en assemblées, et un bureau (constitué au minimum d'un président, d'un secrétaire et d'un trésorier) veille à leur application, tout en jouant un rôle de force de proposition. Concrètement, pour les Modules et les UR des assemblées de producteurs statuent sur la répartition de la ressource en eau ainsi que sur le financement et les modalités de

---

<sup>184</sup> « Ils ne payaient pas l'eau... Dans le District il faut la payer... Bien sûr qu'ils n'ont pas voulu. Ils ne savaient pas ».

maintenance, de conservation, de rénovation et d'opération des canaux correspondant. Cela explique que tous les producteurs interrogés ont fait référence à ces acteurs et qui constituent leurs principaux interlocuteurs pour la gestion de l'irrigation. Dans les DR, outre les Modules qui s'occupent de la gestion des canaux secondaires, il y a aussi la SRL qui s'occupe du canal primaire (Section 2.1.1). Tandis que les autorités interviewées ont toutes fait référence à ce niveau de gestion, rares sont les producteurs qui en ont fait mention. Cela s'explique par le fait que dans la SRL repose sur une assemblée de représentants et non de producteurs. Dans ce cas aussi, les assemblées statuent sur la répartition de l'eau entre les modules, et sur le financement et les modalités de maintenance, de conservation, de rénovation et d'opération du canal. Dans la sous-région de Delicias, il a été fait mention d'une SRL dans le système d'acteur relatif aux UR, mais contrairement à celles du DR elle est constituée d'une assemblée de producteurs et non pas de représentants. Ce cas particulier est traité dans le dernier point de cette section.

En ce qui concerne les ressources, le DR 005 est approvisionné en eau grâce aux barrages, et dans le cas de la SRL San Pedro il s'agit de la Boquilla (Photo 1).



**Photo 1 : Barrage la Boquilla, dit *las Virgenes* (Auteure, 2014)**

La capacité du barrage permet de couvrir plusieurs cycles agricoles, et la répartition des volumes d'eau disponible pour la SRL est calculée annuellement par le Comité Hydraulique (donc en accord avec la

CONAGUA). Dans ce cadre, un plan d'irrigation est établi en fonction du remplissage effectif du barrage et des patrons de cultures. Il est à noter qu'en plus des barrages, les modules valorisent les eaux souterraines au moyen de plusieurs puits (P31, I49) :

- ✓ 86 puits dans le Module 7;
- ✓ 19 puits dans le Module 8.

Ces réserves sont utilisées en complément des eaux du barrage : elles servent essentiellement en dehors des périodes d'ouverture du barrage. Pour accéder à l'eau, les usagers de chaque Module doivent être à jour de leurs paiements : un quota est fixé pour chaque volume d'eau, et les usagers payent ce quota proportionnellement aux volumes d'eau utilisée. Les fonds ainsi collectés servent à financer la maintenance, la conservation, la rénovation et l'opération des canaux du DR (une partie étant versée à la SRL pour les frais relatifs au canal principal). A ce sujet, il convient de remarquer qu'en plus des frais engagés dans l'équipement et les travaux matériels, les quotas versés dans les trois Modules servent aussi à payer des équipes techniques composées d'ingénieurs, d'*aforradores* et de *canaleros*. Le rôle des *aforradores* et des *canaleros* sera commenté ci-dessous, mais à ce stade c'est la figure des ingénieurs qui est importante à relever dans le DR, car elle ne se retrouve pas dans les modalités de gestion des UR.

Dans la sous-région de Delicias, les parcelles des UR sont irriguées en puisant directement l'eau des fleuves, lesquelles sont en partie composées par :

- ✓ les eaux résiduelles (traitées ou non ce point est développé dans la section suivante) ;
- ✓ les drains du DR005.

La Photo 2, prise dans la municipalité de Julimes donne à voir le fleuve Conchos. Une sorte de fumée apparaît au centre de la photo : un tracteur traçait les sillons sur une parcelle irriguée par un canal puisant l'eau directement dans le fleuve.



**Photo 2 : Le Río Conchos alimentant des champs travaillés au tracteur dans la municipalité de Julimes  
(Auteure, 2014)**

Afin de rendre l'utilisation de ces ressources plus efficiente, des *tajos* sont creusés : ces bassins permettant surtout de répartir l'utilisation des ressources dans le temps. Mais cela n'influence pas directement les volumes de ressources disponibles, contrairement aux puits. De fait, les discours concernant les UR n'ont pas fait mention de puit ; cela peut être dû à un caractère illégal de ces infrastructures et non à une absence totale de recours aux eaux souterraines qui sont localement perçues comme particulièrement utiles (ce point est développé dans la Section 3.4.2). Ces ressources sont donc moins fiables que celles des DR : elles réduisent les possibilités de planification et contribue à la vulnérabilité des UR. Comme il a déjà été mentionné, contrairement au système appliqué dans les DR, les producteurs des UR la ressource ne payent pas l'eau en fonction des volumes effectivement utilisés. Outre la détention des concessions d'eau, la seule condition pour accéder à l'irrigation est de s'occuper

de la maintenance (nettoyage) de certains tronçons de canaux. La stratégie adoptée est donc celle de la minimisation des frais. Cela s'étend d'ailleurs à l'ensemble des investissements des UR : la rénovation des canaux et les autres frais relatifs à leur conservation étant ponctuellement votées en assemblées. En outre, seuls des *canaleros* contribuent à l'opération des canaux. L'avantage de cette gestion repose sur les économies financières, mais l'inconvénient est celui de l'inertie (dû au manque de ressources) et au manque de garantie. Face à ce constat, deux groupes de producteurs ont pris la décision de monter des SRL dans les UR et d'augmenter les investissements dans leurs systèmes d'irrigation : ils font notamment appel à des ingénieurs et même à la CONAGUA (ce cas particulier est développé dans la Section 3.4.2).

Jusqu'ici il est apparu que les acteurs des DR et des UR sont les mêmes, mais que des différences existent en ce qui concerne l'approvisionnement en eau et les investissements en capitaux administratifs (relations avec la CONAGUA) et humains (le point suivant explique que comment ces différences se reflètent aussi dans des aspects matériels). Mais pour finir cette présentation de la gestion de l'eau dans ces deux structures, il faut préciser le rôle et les défis associés à la figure des *canaleros* et des *aforradores* qui sont en réalité les *canaleros* qui interviennent sur les canaux primaires de la SRL. Dans les deux cas, ils sont chargés d'opérer la répartition de l'eau en manipulant pour cela les systèmes de vannes correspondants (Photo 3).





**Photo 3 : Un *canalero* indique le système de vanne qu’il opère pour le Module 8 (Auteur, 2016)**

Dans le DR, les *aforradores* et les *canaleros* mesurent les volumes d’eau utilisés par chaque module ou producteur (pour qui les mesures déterminent les paiements). Mais si le plan d’irrigation du Comité hydraulique est traduit en volumes d’eau autorisé par module et par producteur, le fait est que la livraison de ce volume s’opère ensuite concrètement à travers plusieurs tours d’eau. En effet, les besoins en eau des cultures produites dans différentes parcelles varient au cours du temps et du climat (I62). Et encore faut-il ajouter à cela que le volume d’eau nécessaire à l’irrigation d’une parcelle de culture donnée dépend à la fois du débit d’entrée d’eau dans la parcelle, de la nature du sol et des pratiques d’irrigation. C’est pourquoi dans les DR ou dans les UR, le rôle des *canaleros* est crucial et se situe à l’interface entre les besoins et les droits respectivement exprimés en temps et en volumes. Pour cela, sa mission consiste à organiser les tours d’eau des producteurs en fonction de la demande, en ajustant le débit des canaux. Cette tâche est délicate car les demandes se concentrent sur des périodes plus ou moins courtes et que les tours d’eau durent aussi longtemps que le requiert les parcelles. Dans ce contexte, la mission du *canalero* est aussi à l’interface des intérêts individuels : cela implique une part de

négociation avec les différents usagers. La Photo 4 montre une borne du Module 7 : elle incite les producteurs à rationaliser leurs usages de l'eau, et témoigne de la négociation de l'irrigation entre ces deux acteurs.



**Photo 4 : « L'eau que tu jettes aujourd'hui sur ta parcelle, tu en auras besoin demain pour tes semences. Prends en soin ! » (Auteure, 2016)**

Or dans la sous-région de Delicias, les tensions sont nombreuses. Elles trouvent notamment leur source dans un sentiment de dépossession qui repose sur :

- ✓ La légitimité historique des *Labores Viejas* ;
- ✓ Le rôle de la sous-région dans le cadre du TILA (Section 2.1.2).

Dans ce milieu semi-aride où les producteurs voient l'eau couler dans les canaux des autres, ils deviennent témoins de l'exclusion : « *¡Las presas están llenas pero no las abren! Allá llenan los canales, pero no para que corra por el río*<sup>185</sup> » (P11). Cette formule fait référence à l'exclusion des *Labores Viejas* mais de tels sentiments d'injustice et de vol s'expriment tant dans les DR que dans les UR. Ils remettent en cause tour à tour les USA, le DR ou les voisins... Mais ils vont surtout de pair avec

---

<sup>185</sup> « Les barrages sont pleins, mais ils ne les ouvrent pas! Là-bas ils remplissent les canaux, mais ils ne laissent pas l'eau couler jusqu'aux fleuves »



une remise en question des *canaleros*, des Modules et de CONAGUA. Le discours sur la corruption des institutions, des opérateurs et des représentants est de fait omniprésent, et ne concerne pas seulement l'irrigation (Section 3.4.2).

- Expressions des fragilités institutionnelles et culturelles dans le cadre des subventions pour l'adaptation de la gestion de l'eau agricole

Face aux sécheresses qui ont affecté le Mexique au cours des dernières décennies, des programmes nationaux et binationaux ont été mis en place pour améliorer l'efficacité des infrastructures d'irrigation dans la zone d'étude notamment (Section 2.1.2). La CONAGUA et la SAGARPA ont ainsi promu la technification de l'irrigation tant dans le DR 005 que dans les UR : cette section commente en particulier l'accès aux subventions correspondantes ainsi que les conséquences du PADUA.

Le Tableau 28 a été élaboré par CONAGUA pour recenser certaines de ses subventions. Les contributions de l'institution apparaissent comme apports « fédéraux » et « estatales »<sup>186</sup> :

- ✓ tandis que certaines subventions consistent en des investissements directs, c'est-à-dire que CONAGUA finance intégralement le projet ;
- ✓ d'autres reposent sur la « coparticipation » avec le producteur, c'est-à-dire que CONAGUA apporte 50% de l'investissement, mais que le producteur doit apporter le reste.

| Programme  | Composante  | Apports (M\$) |         |         | Total par composante |
|--|---|---------------|---------|---------|----------------------|
|  |   | Fédéral       | Estatat | USagers |                      |
| Programme de réhabilitation, modernisation et technification et équipement des Districts d'irrigation 2014 | Composante réhabilitation et modernisation des Districts d'Irrigation | 35,99         | 14,39   | 21,59   | 71,97                |
|  | Composante équipement   | 7,43          | 0       | 7,43    | 14,85                |
|  | Composante restitution par approvisionnement en volume d'eau          | 7,77          | 0       | 0       | 7,77                 |

<sup>186</sup> Es de notar que no es la única autoridad apoyando los productores: la Secretaria de Desarrollo Rural del estado de Chihuahua (SDR), también aportar el 30% de la inversión para ciertos componentes y aparece en el cuadro como gobierno "estatal". Sin embargo, sus implicaciones se limitan a eso, con lo aparece muy secundaria en comparación con la CONAGUA y SAGARPA.

|   |  | Total | 51,18 | 14,39 | 29,02 | 94,59 |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Programme de réhabilitation, modernisation, technification et équipement des Unités d'Irrigation 2014 |  | 33,12 | 13,25 | 19,87 | 66,23 |       |
|   |  | Total | 33,12 | 13,25 | 19,87 | 66,23 |

**Tableau 27: Subventions de la CONAGUA (2014)**

Avec l'appui de ces subventions annuelles, la SRL ainsi que les Modules du DR005 ont terminé de revêtir les canaux qui sont sous leur responsabilité, et opèrent depuis lors des travaux de maintenance présentés par les acteurs interrogés comme relativement réguliers et satisfaisants. En revanche, il est apparu que le revêtement de canaux des UR et la technification des systèmes d'irrigation au sein des parcelles restent limités. Une partie de l'explication du retard concernant les canaux des UR pourrait s'expliquer par le fait que les fonds de CONAGUA qui leur sont destinés sont inférieurs à ceux des DR. Une grande partie des acteurs interviewés signalent que les autorités publiques (indistinctement CONAGUA et SAGARPA dont le cas est développé ci-dessous) subventionne plus les DR que les UR, tout en nuanciant ce constat : les différences d'opportunités sont plus encore associées à une typologie reposant sur la taille des exploitations (elle est commentée dans la Section 3.4.2). Outre la différence des montants voués à subventionner la technification dans les DR et dans les UR, il faut signaler que l'accès à ces fonds est aussi freiné dans les UR par d'autres raisons qui sont notamment d'ordre structurelles. Parmi elles, il faut rappeler que :

- ✓ en plus des membres du bureau (président, secrétaire et trésorier) les modules comptent sur une administration professionnalisée (des secrétaires, des ingénieurs etc. sont employés à plein temps à ces postes) ;
- ✓ tandis que les UR comptent seulement sur le bureau de direction, et que les démarches relatives à l'administration sont par conséquent exclusivement menées par des producteurs.

Associé aux différents statuts juridiques de ces deux structures, cet aspect est aussi important pour la technification au sein des parcelles. En effet, du point de vue des producteurs les procédés nécessaires pour obtenir des subventions de CONAGUA sont par conséquent différents. Dans le DR les producteurs intéressés se signalent auprès des modules lors des assemblées, et lesquels réunissent et transmettent à la SRL l'ensemble des demandes acceptées sous la forme d'un seul dossier qui en fait de même avant de le faire parvenir à CONAGUA. Au contraire, les dossiers de subventions concernant la technification des parcelles dans les UR doit être entièrement monté et livré par les producteurs à CONAGUA (ils sont

parfois aidés pour cela par des supports de l'adaptation présentés dans la Section 3.4.2). Un dernier élément d'analyse est important à signaler du point de vue des structures administratives : à Chihuahua la SIH est traditionnellement divisée en deux parties, certains fonctionnaires s'occupent des DR pendant que d'autre s'occupent des UR. Or, au moment des enquêtes le responsable en charge des UR avait été renvoyé sans qu'aucun remplaçant ne soit envisagé. Au contraire, en ce qui concerne les DR le responsable était en place et bénéficiait donc du soutien de toute l'équipe qui s'occupe théoriquement des deux structures.

Les représentations nuancent pour leur part l'ensemble des contacts existant entre CONAGUA et les producteurs face aux pénuries en eau. De fait, les discours collectés en dehors de cette institution font presque exclusivement référence à ses fonctions réglementaires et opérationnelles (les quelques exceptions sont des autorités de l'irrigation et des supports qui ne sont pas producteurs). D'ailleurs, en dehors de CONAGUA (et de la JCAS) aucun acteur interviewé n'a fait référence aux différents niveaux de gestion de cette institution : toutes les références emploient le nom générique de « CONAGUA ». Cela indique que les producteurs notamment connaissent mal, ou ne prêtent que peu d'attention aux composantes de cette institution. De plus, peu de producteurs ont fait référence aux subventions de CONAGUA tandis que certains supports et autorités de l'irrigation en ont fait mention. Cela peut être interprété comme un manque de reconnaissance de la part des producteurs et/ou comme un manque d'implication locale de la part de CONAGUA. Dans tous les cas, ces constats tendent à indiquer que les producteurs ont peu d'interactions avec cette institution qui vont dans le sens de l'adaptation aux pénuries en eau. D'ailleurs, il faut signaler que les rares producteurs qui ont fait mention des subventions de CONAGUA (ils se trouvent être aussi des autorités de l'irrigation ou des supports de l'adaptation), ont surtout insisté sur leur caractère limité : « *A él, [el ingeniero] le dice el gobierno federal: 'promueve la tecnificación'. Pero él les dice: 'es que no pueden económicamente, si va a ser al 50-50 no se va a lograr'. Entonces él les hace la propuesta de 90-10<sup>187</sup>* » (P6).

Outre les subventions, CONAGUA a aussi contribué à l'adaptation face aux pénuries en eau à travers la mise en place du PADUA dans le DR (ce programme est présenté dans la Section 2.1.2). Mais au cours

---

<sup>187</sup> « A lui (l'ingénieur) le gouvernement fédéral lui dit : 'développe la technification'. Mais lui il dit : 'c'est qu'ils ne peuvent pas pour des raisons économiques. Si c'est du 50-50 ça ne va pas être possible'. Alors il propose un 90-10 ».

des entretiens ce programme a été peu mentionné par les acteurs interviewés. En particulier, la majorité des producteurs considère son impact comme minime, et les autorités de l'irrigation concernées ont classé cette affaire qui appartient d'après elles au passé. Seuls quelques producteurs et supports de l'adaptation (P35, P56, S60) attirent l'attention sur ce projet en signalant qu'il occasionne des vols d'eau (les parcelles dont les droits d'eau ont a priori été vendus lors du PADUA seraient encore irriguées en volant l'eau d'autres producteurs). De telles situations mettent doublement en cause le PADUA : elles interrogent l'effectivité de son impact sur les facteurs physiques de pénuries en eau, et semble avoir renforcé les tensions locales et le sentiment de dépossession mentionnés dans le point précédent. A ce stade, il faut d'ailleurs ajouter que l'une des relations les plus impactées par ces tensions est celle qui existe entre les producteurs et la CONAGUA comme en atteste les critiques et la méfiance mentionnée des deux côtés par rapport aux données qualitatives et quantitatives fournies par les acteurs correspondants.

Parallèlement aux mesures adoptées par CONAGUA, la SAGARPA promeut aussi la technification de l'irrigation à travers des programmes tels que celui de *Tecnificación del riego*<sup>188</sup> et le *Programa de fomento a la agricultura*<sup>189</sup>. Ces subventions peuvent être sollicités tant par les SRL, que par les modules ou encore par les producteurs du DR ou des UR eux-mêmes (il faut signaler ici que le travail de SAGARPA auprès des modules et des producteurs prend aussi la forme de capacitation et d'appuis techniques qui sont présentés dans la section 3.4.2). Comme avec la CONAGUA, les SRL peuvent soumettre à la SAGARPA des demandes collectives de subventions, tandis que dans les UR les démarches des producteurs sont essentiellement isolées (deux cas d'organisation de producteurs dans les UR sont signalés dans la Section 3.4.2). Les limites structurelles mentionnées précédemment relativement à ces deux organisations s'appliquent aussi en ce qui concerne les relations avec la SAGARPA, mais en moindre mesure puisque celle-ci ne fait a priori aucune différence entre les parcelles comprises dans le DR et dans les UR. Il faut aussi signaler ici que contrairement à la faible visibilité des subventions de CONAGUA, celles de SAGARPA sont plus reconnues parmi les producteurs. Cependant, elles sont présentées comme difficiles d'accès, et donc incertaines essentiellement à cause de :

---

<sup>188</sup> « Technification de l'irrigation ».

<sup>189</sup> « Programme de promotion de l'agriculture ».

- ✓ des difficultés que pose l'adéquation du projet avec les critères établis par la SAGARPA, qui demande entre autre que les infrastructures soient durables (et pérennes) ;
- ✓ la complexité et la longueur des démarches administratives correspondantes.

Ces deux facteurs indiquent avant tout un décalage culturel entre l'institution et les producteurs. De fait, les exigences de SAGARPA sont revendiquées en tant que telles et recherchent d'ailleurs l'engagement des producteurs « *los proyectos deben venir de los productores y sus asociaciones... nosotros los apoyamos, pero son de ellos... y en todo caso tienen que esforzarse para hacerlo bien*<sup>190</sup> » (S24). Une certaine défiance apparaît dans cette citation. Il s'agit d'une peur du clientélisme qui génère des interactions économiques vaines du point de vue de la transformation des pratiques agricoles.

Pour conclure, il est intéressant de noter que la majeure partie des acteurs interviewés dans les deux institutions considèrent comme les producteurs que ces efforts d'ordre essentiellement économiques ne sont pas suffisants dans le contexte agricole actuel. Ces insuffisances marquent d'autant plus les discours dans le cadre des fragilités institutionnelles et des divergences et fragilités culturelles qui viennent d'être signalées. Face à ce constat, d'autres supports de l'adaptation entrent en relation avec le système d'acteurs de la gestion de l'eau afin de compenser ces limites et de faire face aux pénuries en eau.

#### 3.4.2 Capacités et supports d'adaptation face aux pénuries en eau en contexte semi-aride

D'après la FAO notamment pour faire face aux pénuries en eau en milieu agricole irrigué il s'agit certes de développer des infrastructures matérielles adaptées (et économes en eau) mais cette stratégie doit aller de pair avec d'autres transformations d'ordres immatériels, qui reposent sur l'adoption des nouvelles pratiques et la transformation des systèmes d'acteurs de la gestion de l'eau (Sections 1.1.1 et 2.5.1). En parallèle, d'après Birkmann et al. (2013) : « *adaptation as a concept implies actions aimed at making more profound change in socio-ecological relations*<sup>191</sup> » (Birkmann et al., 2013). Cette formule

---

<sup>190</sup> « Les projets doivent venir des producteurs et de leurs associations... nous, on les soutient mais ce sont les leurs... et dans tous les cas ils doivent s'efforcer à faire ça bien ».

<sup>191</sup> « L'adaptation en tant que concept implique des actions qui ont pour objectif de générer des changement plus profond dans les relations socio-écologiques ».

fait référence à la diversité et à la profondeur des processus de transformation qui entrent en jeu dans la définition de la vulnérabilité d'un sociosystème (Section 1.1.2 et 2.5.2). Pour analyser les capacités d'adaptation dans la sous-région de Delicias, cette section s'intéresse à la transformation des pratiques d'irrigation au niveau des parcelles agricoles. En accordant notamment une attention particulière aux interactions culturelles dans le système d'acteur, elle analyse les mesures adoptées concernant les vulnérabilités socio-économiques mais aussi environnementales, dans ce territoire où l'accès à l'eau est rendu d'autant plus difficile par les dégradations de la ressource.

La zone d'étude est caractérisée par plusieurs pratiques agricoles. En termes d'irrigation, plusieurs infrastructures apparaissent au niveau des parcelles : la plus répandue reste l'irrigation traditionnelle par gravité, mais des techniques modernes comme le goutte à goutte et l'aspersion sont aussi notablement utilisées. Ces différentes pratiques d'irrigation sont associées à certains types de cultures destinées à des marchés prédéfinis. Les enquêtes menées ont ainsi démontré que les productions de luzerne et de maïs fourrager sont en grande partie développées par des éleveurs qui consomment leur propre production (P66) ou la vendent localement (P65). En outre, certains producteurs de fourrages (P12) trouvent un marché important dans la région appelée *Comarca Lagunera* (située dans l'Etat de Durango juste au sud de Chihuahua). En dehors de quelques exceptions employant une irrigation par aspersion, les parcelles dédiées à ces cultures sont irriguées par gravité à travers de simples sillons en terre. Le discours justifiant cette pratique porte sur le fait que les investissements dans des infrastructures modernes ne sont pas récupérés au moment de la vente de ces cultures à faible valeur ajoutée. Au contraire, il est apparu que l'irrigation par goutte à goutte est systématiquement employée pour les cultures d'exportation que sont les pastèques, les melons, et les piments verts. Dans le cas de la production de noix, la technique la plus employée est celle de l'aspersion, même si quelques producteurs optent aussi pour du goutte à goutte, ou pour une irrigation par gravité. Enfin, il faut signaler que les parcelles de cacahuètes sont exclusivement irriguées par gravité : malgré le fait que cette culture soit vouée à l'exportation, l'argument est encore une fois que les investissements ne sont pas récupérés au moment de la vente.

Les Photos 5, 5' et 5'' montrent respectivement une culture de luzerne irriguée par gravité, une culture de pastèque irriguée par goutte à goutte, et une culture de noyer irriguée par aspersion.



**Photos 5, 5' et 5'' : Différentes techniques d'irrigation employés dans la zone d'étude (Auteure, 2016)**

A l'issue des entretiens, force est de constater que la technification de l'irrigation prend surtout des formes sous pression : seuls quelques producteurs de noix et d'oignons emploient des moyens modernes d'irrigation par gravité pour l'irrigation de ces produits à fortes valeurs ajoutées<sup>192</sup>. En outre, des exploitations traditionnelles (luzerne et fourrages à faibles valeurs ajoutées et consommation relativement locale, irriguées par gravité) côtoient des productions caractérisées par des rationalités plus modernes (cultures à fortes valeurs ajoutées irriguées sous pression et vouées à l'exportation). Certains agriculteurs associent ces deux formes d'agriculture dans différentes parcelles, mais les discours locaux relayent avant tout une typologie agricole reposant sur la taille des exploitations.

Les discours collectés ont attribué une importance tout à fait notable à la taille des exploitations face aux pénuries en eau : les grands exploitants étant présentés comme moins vulnérables que les autres. Cette typologie a d'ailleurs été plusieurs fois employée pour nuancer les différences de vulnérabilités entre UR et DR. Les producteurs exploitant plus de 100 ha (ou 200 ha) forment ainsi la catégorie des « grands producteurs ». Les autres sont considérés en opposition comme des « petits producteurs », mais certains

---

<sup>192</sup> En l'occurrence, les parcelles dédiées à la culture de l'oignon étaient irriguées en procédant à un nivelage des parcelles et à un tracé de sillon assistés de manière électronique ; tandis que celles dédiées à la culture de noyers étaient irriguées à travers un système multi-vanne (Section 2.3.1).

acteurs distinguent aussi des « producteurs moyens » (exploitations entre 20-30 ha et 100-200 ha) et des « petits producteurs » (exploitations de moins de 20-30 ha). Cette typologie fait référence à une réalité physique et économique, mais elle comprend aussi des dimensions que l'on pourrait dire administratives. Tout d'abord il faut signaler qu'étant donné les extensions signalées, les grands producteurs sont des usagers majeurs du DR. Ensuite, l'idée sous-jacente c'est que les grands producteurs comptent sur un important soutien de la part des institutions, tandis que les autres en recevraient peu. Cette représentation largement relayée est lourde de conséquence dans le sociosystème puisqu'elle fait écho aux problèmes de corruption et contribue donc à le diviser.

Les entretiens réalisés auprès des grands producteurs ont en partie confirmé qu'ils ont eu accès à des subventions à des moments décisifs notamment pour initier les processus de technification. Mais il faut ajouter à cela qu'ils comptent sur des réseaux de distribution présentés comme fiables et que leurs ressources leur permettent aussi d'avoir leurs propres ingénieurs, notamment des agronomes qui opèrent un suivi systématique et quotidien des cultures. Au contraire, les réseaux de distribution des autres producteurs sont souvent présentés comme fluctuants, et l'intervention d'ingénieurs sur leurs parcelles est ponctuelle voire inexistante. Deux sous-groupes se distinguent d'ailleurs en leur sein :

- ✓ les petits producteurs que l'on peut dire isolés car ils ne comptent que sur des recommandations informelles<sup>193</sup> ;
- ✓ et les producteurs qui collaborent avec des agronomes et d'autres supports de l'adaptation.

Ce second sous-groupe est particulièrement intéressant dans la présente étude puisque leurs relations au sein du système d'acteur sont diverses et jouent un rôle décisif pour leurs capacités d'adaptation.

Les actions établies par SAGARPA s'adressent a priori à ces producteurs. Mais le constat est fait qu'en ce qui concerne les aides financières, les grands producteurs répondent plus facilement aux exigences établies par cet acteur (Section 3.4.1). Il en résulte qu'ils ne profitent pas toujours aux destinataires envisagés (S24). Face à l'évidence des différences culturelles et aux variations des besoins agricoles à travers le territoire et le temps, la SAGARPA investit aussi dans des ressources humaines :

---

<sup>193</sup> Les *casas comerciales* (commerces d'agrochimie) semblent tenir une place centrale dans le conseil informel aux producteurs, et mériterait à ce titre une analyse détaillée. Néanmoins elle est rendue difficile par une méfiance témoignée par les commerçants mais aussi par les producteurs.



- ✓ Elle subventionne l'INIFAP, qui fait notamment de la recherche sur les alternatives de technification de l'irrigation dans la sous-région de Delicias ;
- ✓ Elle propose des formations ponctuelles mais aussi des assistances techniques plus pérennes qui prennent notamment la forme d'une équipe de *Sanidad Vegetal* dans la municipalité de Meoquí, laquelle promeut des alternatives d'agriculture durable et d'usage efficient de l'eau ;
- ✓ Enfin, elle promeut la création de *Sistemas Productos* qui concernent localement les cultures de noix et de cacahuètes et ont pour objectif de favoriser les échanges entre producteurs et d'impulser des stratégies collectives de production et de commercialisation.

Plusieurs producteurs ont fait référence à ces organismes comme des supports utiles de l'adaptation. En particulier, les *Sistemas Productos* sont présentés comme des opportunités par les producteurs petits et moyens qui les intègrent. Mais d'autres opportunités sont aussi mentionnées en dehors des initiatives lancées par SAGARPA.

Dans le cadre des UR, l'histoire de deux SRL sont particulièrement intéressantes dans ce sens. La première d'entre elle (par l'ancienneté) est entièrement intégrée à la gestion de l'eau (comme dans le cas des DR) ; et si elle n'emploie pas d'ingénieur ou d'administration professionnelle, ses bureaux sont impactés par un dynamisme qui finit par être aussi pertinent que si c'était le cas. En revanche, l'histoire de la seconde SRL est plus singulière (I5, P6, S15). Contrairement aux SRL du DR, elle a été formée en dehors du système d'acteur de la gestion de l'eau et peut donc être définie comme un support de l'innovation. L'adhésion des producteurs à cette SRL est basée sur le volontariat et transcende les limites prédéfinies des UR. Un plan de gestion a été sollicité et réalisé par CONAGUA pour les producteurs participants.

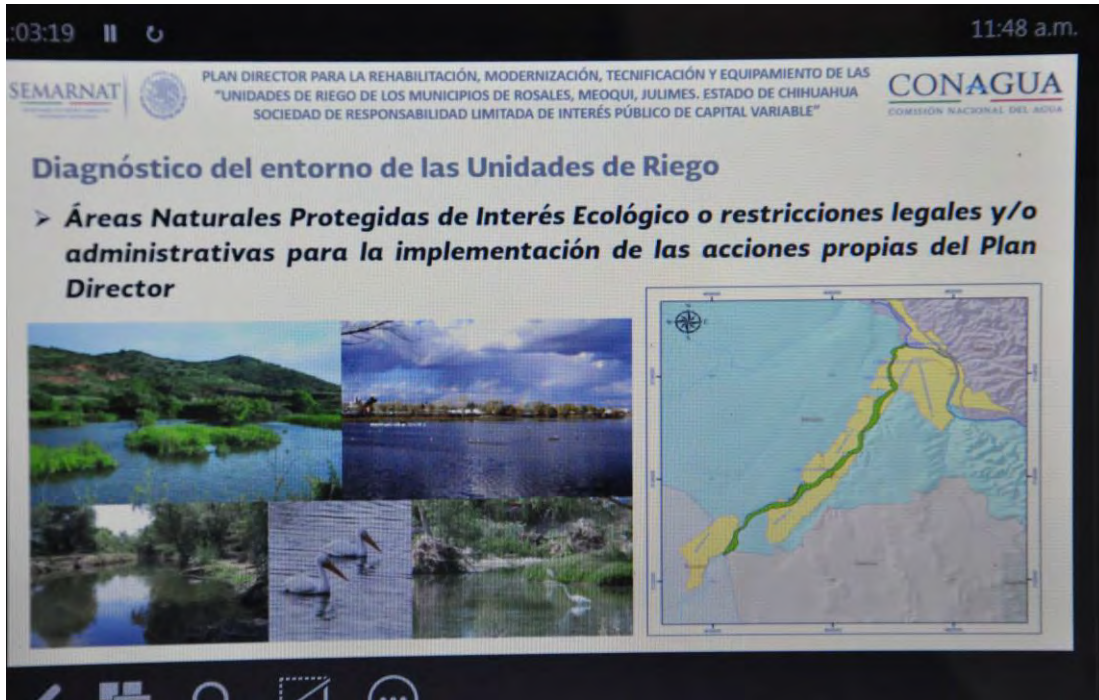


Photo 6 : Diapositive de présentation du Plan Directeur élaboré par CONAGUA à la demande d'une SRL formée par des producteurs d'UR (Auteure, 2015)

Ce plan de gestion est élaboré à partir d'un diagnostic très similaire à ceux établis dans le DR, et suggère d'ailleurs d'augmenter la planification non seulement de la gestion de l'eau mais même des plans de semences. Comme l'indique la Photo 6 l'histoire de cette SRL part de la création d'une réserve RAMSAR sur les berges du Conchos (au niveau de la ville de Delicias) : celle-ci aurait justifié l'intervention du WWF sur le territoire et engendré la sensibilisation et la capacitation d'un ingénieur local en ce qui concerne la préservation de la ressource en eau et les pratiques d'agriculture durable. Après des travaux de concertation dont la longueur et les difficultés ont été signalées par tous les acteurs concernés, la SRL a été créée et la fonction de l'ingénieur officialisée dans ce cadre. L'organisation ainsi formée a notamment :

- ✓ sollicité un diagnostic de gestion de l'eau à CONAGUA ;
- ✓ entamé des interactions avec l'*Asociación Nacional de Unidades de Riego*<sup>194</sup> ;
- ✓ et réclamé à la ville de Delicias qu'elle traite ses eaux usées.

<sup>194</sup> « Association Nationale des Unités d'Irrigation »

L'intention a aussi été formulé de la part de plusieurs acteurs de la SRL de faire entrer les parcelles dans le DR005. Néanmoins, étant donné les mesures comme celle du PADUA les possibilités semblent limitées à ce sujet.

En dehors de ces initiatives, les discours indiquent que diverses démarches sont mises en place dans les modules, dans les comités de développement rural, de manière individuelles etc. pour favoriser l'adaptation. Ces démarches prennent différentes formes :

- ✓ certaines d'entre elles servent à informer les producteurs des programmes de subventions ou des techniques agricoles novatrices,
- ✓ d'autres servent au contraire à aider les producteurs à faire valoir leur droit notamment pour monter les demandes de subventions.

Néanmoins, si les efforts fournis sont divers et nombreux, leurs bénéfiques sont souvent présentés comme limités par leur portée individuelle. De fait, les producteurs intéressés sont peu nombreux : « *En la Comisión Nacional de Zonas Aridas, dan apoyos y donde se meten los proyectos. Se metió un proyecto de una comunidad y un ejido. Y das te cuenta que ellos tienen que venir a las capacitaciones, y no vienen. Los beneficiarios no vienen, o viene uno que otro. Yo lo que hago es aprovechar las capacitacion e invitar a otros. Porque se batalla para que vengan los beneficiarios*<sup>195</sup> » (S10). Ce constat témoigne d'un désintérêt de la part d'une partie des producteurs, laquelle peut s'expliquer soit par une division culturelle soit par un manque de pertinence des propositions qui sont faites. Dans tous les cas, cela confirme que les divisions signalées dans la Section 3.4.1 sont difficiles à dépasser.

Dans ce contexte certaines problématiques sanitaires et environnementales sont peu signalées, et leur « invisibilité » au sein des discours les rend d'autant plus problématiques. En l'occurrence, tandis que les sécheresses des dernières années ont durablement marqué les esprits et par extension les discours collectés, la baisse des nappes phréatiques et les pollutions de l'eau ont rarement été mentionnées par les acteurs interviewés. En ce qui concerne les eaux souterraines, il faut dire que le fonctionnement non linéaire de l'hydrogéosystème suscite des confusions. Ainsi, les producteurs constatent par exemple que dans certaines parcelles de Meoquí l'eau extraite à faible profondeur coule presque sans interruption

---

<sup>195</sup> « Dans la Commission Nationale des Zones Arides, ils donnent des subventions et où on peut mettre des projets. On a mis un projet d'une communauté et d'un ejido. Mais rends-toi compte qu'ils doivent aller aux capacitations, et ils n'y vont pas. Les bénéficiaires ne viennent pas, ou il en vient à peine un ou deux. Moi ce que je fais c'est que je profite des capacitations pour inviter d'autres personnes. Parce qu'on a du mal à faire venir les bénéficiaires ».

(Photo 7). Le phénomène observé relatif aux eaux subsuperficielles et non aux eaux souterraines alimente le mythe de l'abondance et participe au sentiment d'injustice.



**Photo 7 : L'eau extraite à faible profondeur coule presque sans interruption et avive les doutes des producteurs (Auteure, 2017)**

Les doutes portant sur la réduction des ressources en eau sont d'autant plus forts dans l'actualité suite :

- ✓ aux épisodes de sécheresse des dernières décennies au cours desquels tous n'ont pas été également impactés : « *en la tormenta los aguilas se salvan... vuelan alto. Aqui hubo aguilas cuando ya no habia agua*<sup>196</sup> » ;
- ✓ aux stratégies de gestion des réserves d'eau stockées dans les barrages (Section 3.4.1) ;
- ✓ et à l'ouverture d'une industrie de fabrication de bière en plein cœur de la sous-région.

Ces faits renforcent les discours concernant la corruption, en même temps qu'ils incitent les acteurs à poursuivre les extractions de la ressource, ou même à les renforcer. Cela peut en partie expliquer la surexploitation massive des aquifères de la zone d'étude. L'eau de puit y est particulièrement convoitée pour ses usages agricoles car elle est disponible tout au long de l'année (contrairement à celle des

---

<sup>196</sup> « Dans la tempête les aigles s'en sortent... ils volent haut. Il y a eu des aigles quand il n'y a plus eu d'eau ».



barrages) et que sa composition endommage moins les infrastructures d'irrigation sous pression<sup>197</sup>. Dès lors, une forte demande existe sur cette ressource. Dans ce contexte, la négation de la réalité physique de la baisse des nappes phréatiques conduit à relocaliser les puits asséchés. La Photo 8 illustre la relocalisation d'un puit dans le Module 7. Cette démarche est de fait promue par la CONAGUA (sous prétexte de réattribution de concessions obsolètes) et mise en place dans tous les modules étudiés.

| No. LOTE | NOMBRE DEL USUARIO   | SUPERFICIE |
|----------|----------------------|------------|
| 5594     | AMADOR CHAVEZ        | 6.00       |
| 5597     | REFUGIO ARRAS        | 6.00       |
| 5232     | LUIS VILLESAS        | 6.00       |
| 5599     | JOSE LUIS CISNEROS   | 6.00       |
| 5600     | PEDRO MENDOZA        | 6.00       |
| 5602     | OTONIEL SEPULVEDA    | 6.00       |
| 5348     | JOSE SEPULVEDA       | 6.00       |
| 5357     | ROMAN PATIÑO         | 6.00       |
| 5593     | ANTONIO MORALES      | 6.00       |
| 5603     | CHAPO MEZA           | 6.00       |
|          | PAULO CHAVEZ         | 6.00       |
| 5598     | ERICK PEÑA           | 6.00       |
| 5599     | MA. ISABEL RODRIGUEZ | 6.00       |
| 5344     | TOÑO JAVALERA        | 6.00       |
| TOTALES  |                      | 84.00      |

**Photo 8 : « Liste des producteurs bénéficiant de la relocalisation du puit officiel n°87 »**

(Auteure, 2016)

Pour leur part, les problèmes de contamination de l'eau sont peu commentés dans la sous-région de Delicias. D'ailleurs, au cours des entretiens la négation de ces problématiques a pris la forme de tabous (Section 2.5.2). Au sein du système d'acteur de gestion de l'eau potable et des eaux résiduelles la maintenance et l'adaptation des systèmes en place sont freinées par des problèmes financiers. Les usagers ne payent pas toujours l'eau qu'ils consomment, comme l'indique le fait que la JMAS de Meoquí ait mis en place des récompenses pour les usagers à jour de leur paiement. Dans ce contexte la

<sup>197</sup> Quelques grandes exploitations dédiées à des cultures à fortes valeurs ajoutées emploient d'ailleurs leurs propres stations de traitement pour réduire les matières organiques en suspension dans l'eau du canal avant de l'utiliser à travers des systèmes d'irrigation par aspersion ou goutte à goutte.

maintenance et l'extension des infrastructures sont des défis face auxquels les JR ont parfois besoin de faire appel aux ressources des JMAS. En outre plusieurs acteurs ont signalé un manque de capacitation et d'information concernant les personnels chargés des installations de traitement des eaux résiduelles et de potabilisation de l'eau domestique, mais aussi concernant les usagers de l'eau qui devraient adapter leurs pratiques. Cela génère notamment des problèmes du point de vue de l'opération des stations de traitement de l'eau autour desquels planent des séries de doutes (J21) :

- ✓ Qui porte la responsabilité de l'assainissement et du traitement de l'eau ?
- ✓ Comment monter un projet concernant le traitement de l'eau ?
- ✓ Les infrastructures de traitement de l'eau sont-elles bien opérées ?

Des doutes existent aussi en ce qui concerne la potabilisation de l'eau :

- ✓ Comment administrer une JR ?
- ✓ L'eau est-elle chlorée comme il faut dans toutes les JR ?
- ✓ Qui utilise l'eau des stations employant l'osmose inverse ?
- ✓ Comment gérer de telles stations dans le domaine public lorsque les gains attirent les intérêts privés ?

Dans ce contexte, les JR posent tout particulièrement question. La Photo 9 a été prise devant le local d'une JR après qu'un acteur interviewé ait signalé les difficultés rencontrées pour établir un cadre adéquat à l'administration de l'eau potable. Plusieurs acteurs ont signalé ces problèmes d'informations, et témoigné les difficultés rencontrées individuellement pour les dépasser (J1, J3, J52).



**Photo 9 : Local d'une JR de la zone d'étude (Auteure, 2015)**

A ces interrogations concernant la potabilisation de l'eau et le traitement de l'eau, viennent s'ajouter les pratiques agricoles qui peuvent être notablement polluantes. Dans la zone d'étude, rares sont les producteurs qui ont évoqué les bénéfices de l'agriculture biologique ; le problème étant alors que pour être efficaces les démarches adoptées dans ce sens doivent être menées de manières collectives. En somme, les problématiques de qualité de l'eau soulèvent de nombreuses questions dans la sous-région de Delicias auxquelles n'apportent des réponses que quelques démarches ponctuelles, situées au milieu de forts enjeux et inégalités économiques.

Il faut d'ailleurs ajouter qu'aucun support de l'adaptation n'a pu être identifié à ce sujet. Il est notamment apparu que les échanges existant à ce sujet entre la communauté scientifique et les acteurs de la gestion de l'eau sont limités en termes quantitatifs mais aussi en termes qualitatifs. Ce constat s'est plusieurs fois imposé au cours des pratiques d'observation participante. Ainsi, lors de l'Expo-agro/Forum de l'eau qui s'est tenu à Chihuahua en 2016, des variations notables ont pu être observées entre les présentations faites par les agronomes et celles portant explicitement sur la qualité de l'eau.

Cependant, il faut signaler que plusieurs agronomes ont abordé la question de l'agriculture biologique, et l'inocuité. Le vocabulaire employé dans leurs présentations allait dans le sens de la vulgarisation, les questions qualitatives étant systématiquement abordées de manière indirecte. Ce point est apparu comme

essentiel. De fait, dans le cadre des Comités de Développement Durable qui se déroulent mensuellement dans les municipalités, des scientifiques et des ingénieurs ont quelques fois fait référence à des problèmes de contaminations de l'eau et des sols. Néanmoins, au cours des entretiens réalisés auprès des agriculteurs, plusieurs d'entre eux ont manifesté des problèmes d'incompréhension face à ces discours spécialisés. Un dernier résultat est important à signaler à ce sujet : même les organismes et les associations qui s'intéressent à l'environnement (S15 et S20) se détournent en partie de ces deux problématiques (leurs discours restent exclusivement concentrés sur le traitement des eaux noires et sur l'utilisation des eaux superficielles). Les acteurs interrogés ont même signifié qu'il faut traiter les problèmes dans l'ordre : les pénuries, la pauvreté et la santé à court terme étant plus urgents et plus pressants que certains enjeux écologiques et sanitaires associés à des temporalités plus longues (comme c'est le cas de l'arsenic).

Alors que des démarches sont menées localement, le discours de la majorité des acteurs transmet un sentiment de fatalité relatif aux dimensions physiques et socio-économiques des pénuries en eau. Ce même discours freine les tentatives d'adaptation et enracine d'autant plus la vulnérabilité du socio-système.

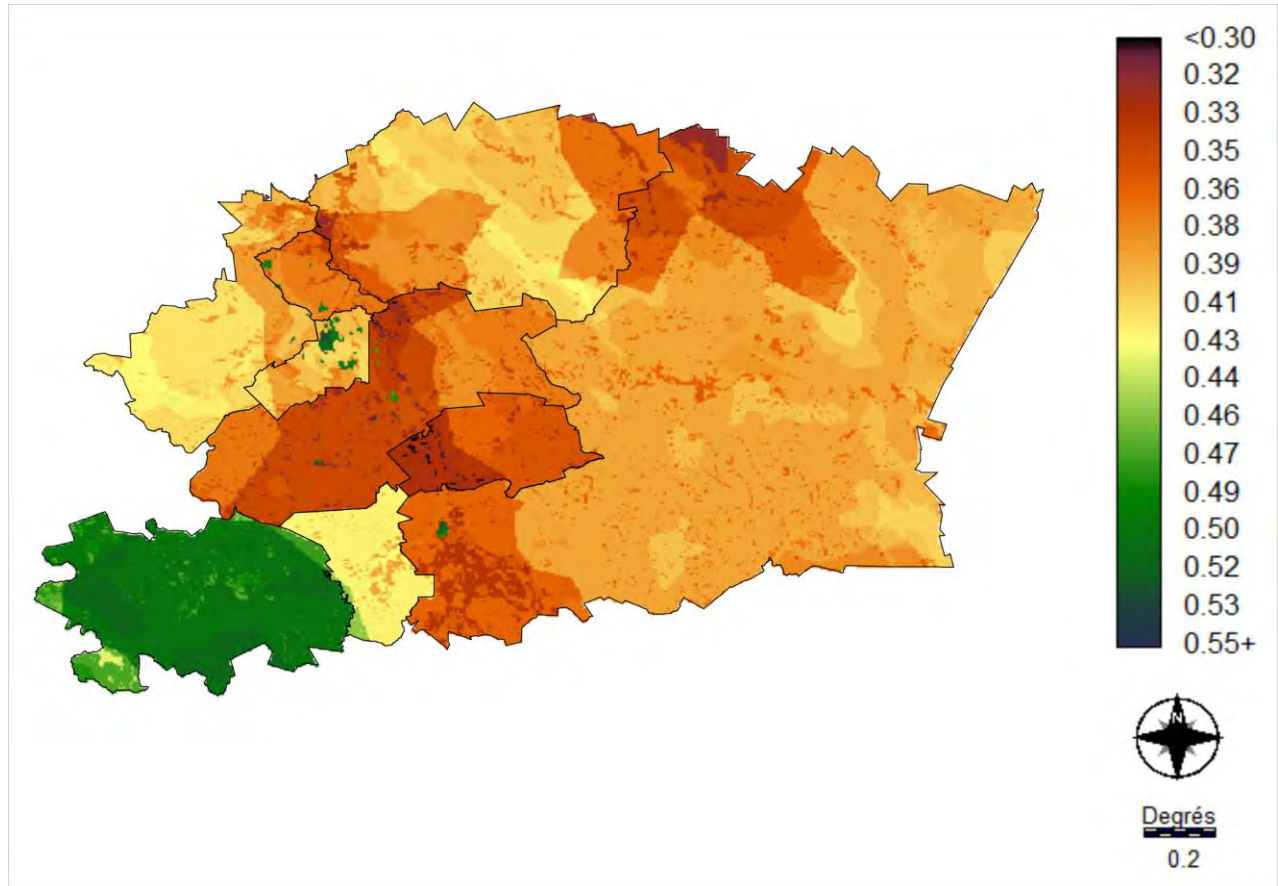
### 3.4.3 *Synthèses et discussion du diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilités associées aux pénuries en eau dans la sous-région de Delicias*

Deux analyses ont été menées afin de réaliser un diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilité associée aux pénuries en eau dans la sous-région de Delicias. Cette section synthétise et discute les résultats obtenus en termes de vulnérabilité.

La carte d'IPE-SIG spatialisé apporte conjointement des renseignements sur l'exposition aux pénuries en eau et sur les fragilités socio-économiques du socio-système. Ainsi, il apparaît que la région d'étude concentre des aptitudes majoritairement comprises entre 0,30 et 0,43, ce qui lui confère une pauvreté en eau sévère (Maheswari, et al., 2017). L'étude plus approfondie de la Carte permet de préciser les différentes dimensions de l'exposition et des fragilités qui occasionnent cette vulnérabilité. Tout d'abord,



noter l'impact de la composante ressource sur la zone d'étude qui est exposée à un contexte hydro-climatologique caractéristique des territoires semi-arides. La pauvreté en eau signalée sur la carte parle aussi des territoires ruraux qui s'avèrent vulnérables par rapport à l'accès à l'eau et à la capacité (développement humain). Au contraire, les villes se démarquent du reste du territoire avec des aptitudes supérieures qui leur confèrent des pauvretés en eau moyennes et signale leur faible vulnérabilité en comparaison avec les territoires ruraux. Ensuite, les variations municipales sont légères sur l'ensemble de la carte ; mais plus encore, les quatre municipalités concernées par la collecte (Delicias, Meoquí, Julimes et Rosales au nord-ouest de la carte) ont des comportements similaires. Cela fait écho à la présentation qui a été fait de ce territoire du point de vue social (Section 2.1.2) et semble indiquer une unité en termes de fragilités économiques. Une autre caractéristique s'avère commune à l'ensemble de la sous-région de Delicias : ses corridors agricoles sont particulièrement affectés par la surexploitation des aquifères. En outre, il faut ajouter que le DR005 n'apparaît pas sur la Carte 63 : cela s'explique par le fait que ses fortes aptitudes en termes d'usage sont compensées par les indicateurs d'accès et de contamination. Autrement dit, l'exposition agricole aux problématiques écologiques est localement neutralisée par les forces économiques de telle sorte qu'elle n'augmente pas, ni ne diminue sa vulnérabilité. En revanche quelques aires apparaissent avec de faibles aptitudes sur la carte relativement aux transformations de l'USV notamment.



**Carte 63 : IPE-SIG spatialisé dans la sous-région de Delicias**

En somme, la région est exposée à des problématiques environnementales de surexploitation des aquifères et de contaminations agricoles, mais dans ce contexte la population qui se concentre essentiellement dans les villes ont de faibles fragilités socio-économiques. Ce panorama reprend une partie notable de ce qui avait été présenté dans la région d'étude. Cependant, il présente trois limites particulièrement notables dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité puisqu'il ne dit rien :

- ✓ de la problématique de contaminations en arsenic ;
- ✓ des fragilités institutionnelles et culturelles ;
- ✓ des capacités d'adaptation du sociosystème.

L'étude qualitative des discours a été menée de telle sorte à apporter des éléments de réponse sur ces trois thématiques du point de vue des vulnérabilités sociales.

A ce sujet, il est apparu que le sociosystème articule la gestion de l'eau à travers un système d'acteurs à trois branches relatives :

- ✓ à l'eau potable, à l'assainissement et au traitement des eaux résiduelles ;
- ✓ à l'eau d'irrigation dans les DR ;
- ✓ à l'eau d'irrigation dans les UR.

Les relations qui caractérisent les DR et les UR présentent des points communs et des différences notables du point de vue des vulnérabilités sociales. Les DR comptent sur des structures tant administratives (planification, personnel spécialisé) que matérielles (barrages, puits) qui le singularise des UR. Celles-ci réduisent la vulnérabilité du DR face aux pénuries en eau en garantissant son accès à la ressource et en facilitant ses démarches auprès des institutions. Néanmoins, en dehors de ces deux aspects, la gestion de l'eau dans les DR et dans les UR est d'autant plus similaire que les producteurs qui les composent sont les mêmes. En outre, l'irrigation repose sur des temporalités spécifiques et denses dont la gestion présente de nombreux défis, auxquels font face les figures incontournables de *canaleros*. Dans les DR comme dans les UR, les relations existant entre l'hydrosystème, les autorités et les opérateurs de l'irrigation, et enfin les producteurs sont complexes. Elles prennent notamment la forme de différentes pratiques (semences et systèmes d'irrigation) qui s'expliquent aussi en partie par des aspects économiques associés à la valeur ajoutée des cultures et aux marchés considérés (Eakin, 2003, 2005 ; FAO, 2012). Dans la région d'étude il s'est avéré que la complexité de ces relations alimentent certaines tensions et occasionnent des fragilités sociales : les voisins sont parfois accusés de vols d'eau, et les autorités et opérateurs de l'irrigation de corruption. De telles tensions se retrouvent dans la plupart des structures agricoles (Ocampo-Fletes, 2004), mais au Mexique ces tensions prennent une dimension particulière par suite d'une fragilité institutionnelle notable (Avila, 2003 ; Campos Cabral et Ramirez Juarez, 2009). Et en ce qui concerne la sous-région de Delicias il faut encore ajouter que les tensions sont alimentées par un contexte géopolitique singulier et des dynamiques hydroclimatiques renforçant l'exposition aux pénuries en eau mais aussi les fragilités culturelles.

Deux institutions impactent de manière particulièrement forte les vulnérabilités liées aux pénuries en eau en milieu agricole dans la sous-région de Delicias : CONAGUA et SAGARPA. En ce qui concerne CONAGUA, il faut signaler que son rôle dans la création du DR 005 a impacté de manière décisive la vulnérabilité de la zone d'étude au sein de laquelle l'agriculture irriguée tient une place majeure. Mais depuis, la distance qu'elle a prise avec ce pôle agricole réduit son impact dans les stratégies de gestion et d'adaptation : en dehors de certains programmes ponctuels et de subventions dont les limites ont été signalées dans la section 3.4.1, son périmètre d'intervention est surtout réglementaire. Celui-ci éloigne

d'autant plus la CONAGUA des usagers agricoles qu'en plus des intérêts locaux, il doit prendre en compte les accords internationaux existant entre le Mexique et les USA. Cette position est critiquée par la littérature spécialisée (Paz Sanchez, 2012) et par les discours d'acteurs qui s'avèrent particulièrement soupçonneux. En somme, CONAGUA est marquée par une fragilité institutionnelle notable qui est même signalée par le Gobierno del Estado de Chihuahua (2011). En ce qui concerne SAGARPA la fragilité institutionnelle existe aussi, mais elle est moins prononcée que dans le cas de CONAGUA. Il faut dire que sa présence (directe et indirecte) sur le terrain est remarquable, grâce à quoi les critiques et les silences sont moins nombreux, et dans les discours la négociation semble prendre plus souvent le pas sur la suspicion. Cela fait écho aux travaux de Heijs (2001) qui signale l'intérêt des relations continues pour favoriser la transformation des pratiques.

De telles perspectives rejoignent de fait la question des capacités d'adaptation face aux pénuries en eau. Dans la sous-région de Delicias l'attention à ce sujet porte essentiellement sur la technification de l'irrigation (Ortega-gaucin, et al., 2008). Les principaux défis concernent les parcelles elles-mêmes. Or à ce niveau il est apparu que la volonté des producteurs prime. D'ailleurs, il en est de même pour la gestion de l'eau potable et de l'assainissement dans les milieux ruraux dans la zone d'étude mais aussi ailleurs au Mexique (Jimenez Cisneros, 2008). pour supporter ces mesures d'adaptation qui entrent dans le cadre de l'agir politique (Sturma, 2013). Ces réseaux favorisent le développement d'infrastructures et l'adoption de nouvelles pratiques qui vont dans le sens de la potabilisation de l'eau, l'assainissement des eaux résiduelles, et la technification de l'irrigation. A ce sujet, il faut néanmoins préciser que les motifs de ces transformations sont avant tout économiques. En outre, ces motifs impactent notablement les pratiques qui vont dans le sens de la potabilisation de l'eau. Et cette même rationalité accélère aussi les l'assainissement des eaux résiduelles (négociation des agriculteurs avec les autorités). Dans ce sens le retrait de CONAGUA est notable (du point de vue administratif mais aussi en ce qui concerne les autorisations de relocalisation de puits agricoles). Dans ce contexte, les enjeux environnementaux et sanitaires qui s'expriment sur le long terme (épuisement des aquifères, désertification et intoxications chroniques à l'arsenic) ne sont traités que par les scientifiques qui ne parviennent pas à trouver les moyens (communications et collaborations) pour que passent leurs messages. Pourtant leurs impacts sont déjà sensibles dans la région, qui est d'ailleurs touchée par d'importantes migrations vers les USA. La lenteur des transformations socio-culturelles qu'exige l'adaptation face aux pénuries en eau, associées aux expériences de dépossession signalée dans la Section 3.4.2, engendre un sentiment de

fatalité qui freine rétroactivement l'adaptation. Le frein est double : certains acteurs se résignent (Sturma, 2013), et parmi ceux qui se montrent dynamiques ou volontaires une partie tient un discours défaitiste sur les stratégies collectives. Pourtant les remaniements de fond sont nécessaires, et certains acteurs continuent de militer pour qu'ils s'opèrent collectivement.

Les méthodes adoptées confèrent à l'étude un niveau de précision intéressant, mais elles ne permettent pas d'atteindre l'exhaustivité holistique qui serait souhaitable pour diagnostiquer la vulnérabilité dans l'optique de l'aide à la prise de décision (Birkmann et al., 2013). A ce sujet, il est d'ailleurs notable que les deux analyses coïncident sur un tabou : celui de l'arsenic (et plus généralement celui de la contamination de l'eau). Mais malgré ces restrictions, l'association des approches quantitatives et qualitatives apparaît intéressante. En particulier, l'analyse des discours permet d'expliquer la surexploitation des aquifères à travers la complexité des dynamiques agricoles que l'IPE-SIG ne touche qu'en surface. En outre, cette analyse confirme l'importance de la communication relative aux facteurs physiques de pénuries en eau qui ne sont pas toujours visibles (Urquiza Gómez & Cadenas, 2015) : sans elle, les mythes de l'abondance renforcent les tensions qui s'expriment localement. A Delicias, il apparaît que cette communication est limitée et la cristallisation des tensions sociales forment des cercles vicieux qui renforcent les pénuries. Enfin, l'association de différentes échelles d'analyse permet d'aborder les différentes dimensions des vulnérabilités associées aux pénuries en eau et de réaliser un diagnostic d'autant plus riche (Becerra, 2012). Afin de donner à ce diagnostic une forme synthétique (en accord avec les critères de l'aide à la prise de décision), les apports conjoints de l'IPE-SIG et de l'analyse qualitative à Delicias sont synthétisés dans une matrice AFFOM. Elle est présentée dans la conclusion partielle puisque, en accord avec Hill & Westbrook (1974), elle n'est pas comprise comme une analyse à proprement parler, mais plutôt comme une synthèse.

## Conclusions partielles

L'analyse a été élaborée relativement à plusieurs niveaux de résultats concernant : les cartes d'indicateurs normalisées, l'IPE-SIG municipal, la modélisation de l'IPE-SIG (incluant les trois scénarios d'EMC), les vulnérabilités sociales, et le croisement des diagnostics quantitatifs et qualitatifs.

En ce qui concerne les cartes d'indicateurs (Section 3.1) il faut signaler que les calculs et analyses cartographiques effectués à partir des données publiques permettent de construire toutes les composantes de l'IPE, et ce en utilisant essentiellement des approches hydrologiques et environnementales pour évaluer les quantités de ressources ainsi que la préservation environnementale. Néanmoins, l'objectif fixé concernant les indicateurs hydrologiques et environnementaux n'est qu'en partie atteint car les indicateurs de qualité de l'eau n'ont pas pu être construits à partir de données et d'échelles complètement satisfaisantes. Pour remédier à certains manques, le choix a été fait de construire des indicateurs de telle sorte à insister sur les problématiques correspondantes. Cette démarche va dans le sens de la négociation avec les autorités publiques pour l'élaboration de diagnostics pertinents dans le cadre de l'aide à la prise de décision. Cette même perspective justifie d'ailleurs aussi que les indicateurs qui sont traditionnellement élaborés à partir du PIB aient été adaptés dans cette étude en fonction des traditions mexicaines de suivi économiques. Cependant il faut signaler que cela limite la répliquabilité de la méthode et, par conséquent, les possibilités de comparaisons des résultats en dehors du territoire mexicain.

Avec ces atouts et ces restrictions, les cartes d'indicateurs normalisées tracent un portrait de la région d'étude qui est considéré comme cohérent dans la mesure où elles font écho à la littérature spécialisée portant sur l'Etat de Chihuahua. D'ailleurs les cartes obtenues dressent un panorama intéressant de la région. Les indicateurs d'accès et de capacité insistent en particulier sur la marginalisation de la Sierra ; même si elles sont critiquables, les fortes similitudes existant entre les sept indicateurs considérés situent les résultats dans la tradition de calcul de l'IPE. Les indicateurs d'usage donnent à voir le dynamisme économique qui était mis en avant dans les travaux de Rentería Flores & Pérez Arredondo (2010) notamment. En revanche, les indicateurs de ressource engendrent des représentations cartographiques qui mettent en avant le caractère principalement désertique de l'Etat à travers des aptitudes plus faibles

dans les espaces semi-arides et arides que dans la Sierra. Enfin, les indicateurs d'environnement sont scindés en deux ensembles : deux indicateurs de qualité de l'eau génèrent des tendances similaires aux indicateurs d'accès et de capacité, tandis que le dernier indicateur de qualité de l'eau ainsi que deux indicateurs de préservation environnementale signalent des impacts environnementaux qui sont particulièrement notables dans les corridors de développement.

Les résultats obtenus pour l'IPE-SIG municipal (associant ces cartes d'indicateurs à l'échelle des pixels représentant 500m<sup>2</sup>) présentent des variations inter et intra-municipales. Ces deux niveaux de variations reflètent la juxtaposition complexe des facteurs socio-économiques et hydro-environnementaux sur le territoire *chihuahuense*, qui concentre des pauvretés en eau moyennes. Il apparaît ainsi que la carte obtenue est essentiellement interprétable à l'échelle municipale. Exception faite de quelques municipalités situées dans le désert, la Sierra obtient en effet des aptitudes inférieures au reste du territoire. En outre, les municipalités particulièrement productives obtiennent les aptitudes les plus fortes. D'ailleurs, l'IPE-SIG municipal reste fortement corrélé à l'IDH. Pourtant en comparant ces deux indices, il apparaît que les composantes ressources et environnement apportent des nuances qui sont plus ou moins perceptibles dans la seule carte de l'IPE. La surexploitation des aquifères associées aux pratiques agricoles intensives est notablement mise en évidence dans l'IPE-SIG municipal. En revanche, le contexte semi-aride du désert est peu perceptible visuellement, mais il apparaît que son impact statistique est certain. En somme, en tenant compte du contexte hydro-climatique de l'Etat de Chihuahua ce premier scénario d'IPE permet de mettre en évidence deux facteurs importants de pénuries en eau dans un diagnostic synthétique : la surexploitation des aquifères dans les corridors de développement, et la précarité socio-économique qui caractérise la Sierra ainsi que quelques municipalités désertiques.

Mais en concentrant l'impact (majoritairement positif) des indicateurs socio-économiques dans les aires correspondant aux pôles agricoles et urbains du territoire, un autre scénario met en évidence des problématiques similaires sous une forme différente. De cette manière, l'IPE-SIG spatialisé distingue positivement quelques aires agricoles et met en évidence la pauvreté en eau multidimensionnelle de certains territoires ruraux. Plus généralement, il apparaît que la contamination agricole nuance les bénéfices de cette activité et neutralise son impact du point de vue de la pauvreté en eau. En outre, l'IPE-SIG municipal permet d'insister sur les problématiques d'accès à l'eau et au développement humain en milieu rural. Le troisième scénario qui réduit la compensation dans les calculs effectués

(grâce à la méthode OWA) donne un autre aperçu des enjeux agricoles relatifs à l'accès à l'irrigation et aux dégradations environnementales (contaminations agricoles et surexploitation des aquifères). De plus, l'IPE-OWA permet d'insister sur l'importance de préserver la composante ressource. Même si (comme dans le cas des calculs statistiques de l'IPE) l'analyse séparée des indicateurs ou des composantes reste importante pour donner du sens aux résultats finaux, il faut signaler qu'en adoptant et en comparant trois scénarios d'IPE-SIG, la modélisation obtenue permet de justifier des prises de décisions complémentaires et pertinentes à différents niveaux.

Les conclusions des diagnostics sociaux et interdisciplinaires sont pour leur part synthétisées dans le tableau 28.

|                           | Forces  | Faiblesses   |                           |
|---------------------------|---|--|---------------------------|
| IPE-SIG                   | Usages de l'eau (valeur économique)<br>Accès et Capacité en milieu urbain   | Marginalisation des milieux ruraux   |                           |
| Système agricole          | Dynamiques modernes (cultures à valeur ajoutée, technification, marchés)<br>Infrastructures administratives des DR<br>Initiatives ponctuelles dans les UR   | Fragilités économiques (Inégalités)<br>Fragilité sociale (Division et défiance)<br>Fragilité institutionnelle (Critiques, corruption)<br>Fragilité culturelle (sentiments de dépossession, de fatalité et négation et tabous des réalités physiques) |                           |
| Eau potable et résiduelle | Organisation en réseaux<br>Initiatives ponctuelles des responsables   | Inégalités<br>Problèmes de paiements<br>Manque de formations (et de supports)  |                           |
|                           |   |  |                           |
|                           | Entrées d'argent des stations de potabilisation de l'eau<br>Rapprochements sciences/société   | Sècheresse<br>Contaminations en arsenic<br>Contaminations associées au manque de traitement des eaux résiduelles   | Eau potable et résiduelle |
|                           | Soutiens à la technification<br>Création de réseaux (Sistemas Productos, labels)<br>Nombreux supports de l'adaptation économique (locaux et internationaux)<br>Rapprochements sciences/société (Agriculture biologique) | Conflits (et désertification) liés à la dépossession<br>Sècheresse<br>Problèmes environnementaux à moyens et longs termes (surexploitation des aquifères et contaminations agricoles)  | Système Agricole          |
|                           | Technification de l'irrigation<br>Agriculture biologique  | Exposition à l'aridité (Ressource)<br>Exposition à la surexploitation des aquifères<br>Exposition aux contaminations agricoles   | IPE-SIG                   |
|                           | <b>Opportunités</b>   | <b>Menaces</b>   |                           |

**Tableau 28 : Synthèse AFFOM relative aux vulnérabilités associées aux pénuries en eau**



Par-delà sa pertinence dans la région d'étude, le diagnostic multi-scalaire qui a été établi dans la présente étude apporte des éléments de réponse intéressants au sujet des vulnérabilités liées aux pénuries en eau à Chihuahua, et fait même écho à certaines études portant sur d'autres territoires au Mexique. L'un des apports de cette recherche réside aussi dans la diversité qu'elle signale dans l'Etat de Chihuahua : elle permet de relativiser sa singularité et son succès au sein des territoires mexicains.

## **Conclusions générales**

Afin de réaliser un diagnostic de vulnérabilité sur les pénuries en eau au Mexique, la méthode de calcul de l'IPE peut être complétée en considérant les apports d'autres disciplines. L'objectif de l'étude est alors d'adapter et de compléter l'indice en associant plusieurs méthodes de telle sorte à analyser l'exposition, mais aussi les fragilités du sociosystème et ses capacités d'adaptation face aux dégradations qualitatives et quantitatives de la ressource et aux problèmes multidimensionnels de pauvreté, d'accès à la ressource et de préservation de l'environnement et de la santé. Cinq sous-objectifs sont ainsi définis pour diagnostiquer la vulnérabilité associée aux pénuries en eau à partir de l'IPE :

- ✓ Construire les indicateurs de ressource et d'environnement de manière spécifique, afin de réaffirmer l'interdisciplinarité du diagnostic.
- ✓ Construire l'IPE en appliquant une EMC pour augmenter la visibilité des indicateurs de ressource et d'environnement et renforcer l'interdisciplinarité des résultats.
- ✓ Adopter une méthodologie réutilisable (pour le moins au Mexique) et permettant d'obtenir des résultats synthétiques mais aussi représentatifs de la diversité territoriale.
- ✓ Favoriser l'identification des facteurs potentiellement problématiques, associés aux milieux agricoles et ruraux.
- ✓ Analyser qualitativement les discours afin de compléter les résultats obtenus avec l'IPE-SIG du point de vue de la vulnérabilité sociale associée aux pénuries en eau dans une perspective d'aide à la prise de décision.

La réflexion menée présentement est donc avant tout méthodologique, mais elle permet d'observer les différentes dimensions physiques et sociales des pénuries en eau et de la vulnérabilité dans l'Etat de Chihuahua.

Quatre sous-objectifs impliquent d'adapter la méthodologie de l'IPE grâce à des outils cartographiques. Tout d'abord, les indicateurs de ressource et d'environnement ont été préférentiellement construits à travers des bases de données cartographiques en provenance d'institutions comme CONABIO et CONAGUA. De cette manière, la méthode conserve une démarche de collaboration avec les autorités publiques tout en réaffirmant l'interdisciplinarité du diagnostic. En effet, les bases de données exclusivement statistiques mettent particulièrement en évidence les facteurs de développement : elles sont donc pertinentes par rapport aux dimensions socio-économiques des pauvretés en eau, mais gommement leurs dimensions physiques. D'ailleurs, alors que l'ensemble des indicateurs de Ressource ont pu être construits à partir de données cartographiques, il est notable que seule une partie des indicateurs

d'environnement ait pu l'être. En particulier des carences apparaissent dans les données publiques relativement aux problématiques de qualité de l'eau (qui tiennent aussi une place particulière dans les résultats des analyses sociales). Face à ces manques, le choix a été fait de construire les indicateurs de telle sorte à insister sur ces problématiques et à encourager les discussions à leur sujet. Cette démarche appelle à être poursuivie dans d'autres études. Dans le cas présent, les cartes d'indicateurs obtenues présentent certaines redondances entre les composantes accès et capacité, et dans une moindre mesure environnement. Néanmoins la composante ressource ainsi que certains indicateurs d'environnement (comme celui de surexploitation des aquifères) diversifient les cartographies, à travers des formes et des comportements plus singuliers au sein de la zone d'étude. L'utilisation de données cartographiques apparaît donc comme une opportunité pour favoriser l'interdisciplinarité de l'IPE, mais peut-être aussi l'uniformisation de la méthode. En outre, il faut noter que la littérature spécialisée discute la composition de l'IPE, changeant le nombre de composantes employées pour son calcul. L'intégration des alternatives cartographiques pourrait faire avancer les débats à ce sujet en enrichissant les discussions sur la sélection des indicateurs, mais aussi sur les stratégies d'agrégations (méthode OWA).

La présente étude a d'ailleurs été réalisée de telle sorte à favoriser les discussions puisqu'elle a adopté une méthodologie de calcul réutilisable pour le moins au Mexique, tout en veillant à générer des résultats à la fois représentatifs de la diversité territoriale et synthétiques. A ce sujet, il faut signaler que l'IPE a été construit en valorisant exclusivement des données publiques (tant pour la construction que pour la normalisation des indicateurs). A ce titre, elle peut être appliquée partout au Mexique. En revanche, sa réutilisation en dehors du Mexique est limitée par le fait que certaines données sont élaborées à travers des méthodes singulières. C'est notamment le cas des données économiques (les données de PIB n'étant pas publiées à l'échelle municipale dans tout le pays). Mais en dehors de ces exceptions, la réflexion menée présentement sur la construction et la normalisation des indicateurs appelle à être discutée et poursuivie dans de futures études. En ce qui concerne les résultats, les atouts (synthèse) et les faiblesses (clarté) de l'IPE à travers des outils SIG sont relativement comparables à ceux obtenus à travers des méthodes statistiques, mais il faut signaler quelques apports du point de vue de la représentativité territoriale et de la présentation des résultats. Tout d'abord, les résultats obtenus au niveau municipal donnent à voir des variations intéressantes sur le territoire de Chihuahua : trois ensemble géographiques se démarquent plus ou moins fortement en son sein (selon les échelles de calcul et les méthodes d'agrégation). Ensuite, comme dans la tradition statistique, il est apparu que

l'interprétation des résultats cartographiques est d'autant plus riche en associant plusieurs niveaux de résultats. A ce sujet, le support et la tradition des diagnostics cartographiques enrichissent les discussions déjà existantes au sujet de l'IPE.

La spatialisation de l'IPE apporte des éléments de réponse intéressants en ce qui concerne la visibilité des facteurs hydro-environnementaux et des problématiques agricoles et rurales. Même si les résultats sont essentiellement interprétables au niveau municipal, d'autres variations apparaissent plus ou moins fortement selon les échelles de calcul et les méthodes d'agrégations utilisées. Les alternatives présentement retenues illustrent notamment les paradoxes du développement agricoles dans l'Etat de Chihuahua en insistant sur la surexploitation des aquifères. En revanche, si la marginalisation des territoires ruraux a aussi été mise en évidence, d'autres stratégies d'analyse et de présentation des résultats pourraient être encore plus parlantes à ce niveau. D'une part il faudrait avoir accès à plus d'indicateurs au niveau local, et d'autre part, deux cartes pourraient même être réalisées séparément pour diagnostiquer la pauvreté en eau des milieux urbains et ruraux. Finalement, la spatialisation des indicateurs socio-économiques et l'adaptation de la compensation dans les différentes phases de calcul constituent des opportunités mais aussi des défis méthodologiques (données locales, stratégies de spatialisation, de compensation et de représentations finales...). Dans ce contexte, l'un des apports les plus notables de cette étude réside dans la démonstration que les alternatives ouvertes par l'EMC pour le calcul de l'IPE permettent de développer des diagnostics différents mais pertinents chacun dans leur domaine, et ce au moyen d'opérations répliquables et transparentes. Cela étend les possibilités de calcul ainsi que la pertinence de l'IPE dans le cadre de l'aide à la prise de décision.

Le dernier sous-objectif attire quant à lui l'attention sur l'analyse qualitative des discours en adoptant une approche relationnelle et en considérant trois sous-hypothèses dans la sous-région de Delicias. La première sous-hypothèse était que la régulation sociale hiérarchise les pénuries en eau agricoles, favorisant la structure des DR et défavorisant celles des UR qui entretiennent notamment différentes relations avec les institutions. DR et UR entretiennent effectivement différentes relations avec les institutions (puisque CONAGUA intervient dans le Comité Hydraulique des DR), mais à l'échelle des producteurs cela se traduit aussi par différentes relations avec l'administration et les ingénieurs (embauche de professionnels dans le DR). Cela se traduit dans une garantie renforcée de l'accès à l'eau. Mais il faut néanmoins nuancer cette différence puisque l'opération concrète de l'irrigation est un processus complexe au sein duquel apparaissent des tensions d'autant plus fortes dans la région d'étude

que les pratiques locales s'associent à des conjonctures internationales mais aussi hydroclimatiques et contribuent à renforcer les manques d'eau.

Une autre sous-hypothèse concernait les représentations et les pratiques et suggérait qu'elles incluent l'aridité comme une menace en conférant néanmoins une faible visibilité aux problèmes de qualité de l'eau. Les résultats ont infirmé une grande partie de cette hypothèse. En effet, les représentations et les pratiques sont plutôt marquées par l'expérience de la sécheresse et du manque d'eau. En revanche, la visibilité des problématiques qualitatives est restreinte, et il faut ajouter que des doutes sont témoignés à l'égard des dynamiques des ressources souterraines. Associés aux tensions mentionnées ci-dessus le manque d'eau est perçu comme une injustice, et la sécheresse comme une menace relativisée par le mythe de l'abondance. Plus encore que l'aridité, la sécheresse ou le manque d'eau c'est un sentiment de dépossession qui prédomine dans les représentations et dans les pratiques qui nient certaines réalités hydrogéologiques et accroissent encore les facteurs physiques de pénuries en eau.

Une troisième sous-hypothèse était que l'adaptation se fait à travers des processus de régulation sociale spécifiques, au sein desquels les institutions jouent un rôle qui détermine fondamentalement les vulnérabilités concernant notamment les problèmes environnementaux et les problèmes sanitaires qui affectent les milieux ruraux. A ce sujet l'analyse a démontré que l'adaptation s'opère avant tout par rapport à des rationalités économiques. Dans ce cadre, la SAGARPA joue un rôle important, directement mais aussi indirectement qui favorise la technification des systèmes d'irrigation, le rapprochement des producteurs et le développement de stratégies de production mais aussi de vente des productions agricoles. Les démarches correspondantes s'adressent aux producteurs sur la base du volontariat : des critiques sont notables tant de la part des producteurs que de celle de SAGARPA, mais certaines relations sont aussi présentées de manières élogieuses (*Systemas Productos, INIFAP, etc.*). En comparaison, CONAGUA intervient sur des aspects réglementaires (PADUA, et relocalisation des puits) : même si certaines de ces interventions sur le terrain vont dans le sens de la technification des systèmes d'irrigation, elles sont plus critiquées que celles de SAGAPRA. Des démarches sont aussi adoptées dans le sens de l'attention sanitaire et environnementale (stations de potabilisation de l'eau, d'assainissement et de traitement de l'eau résiduelle), mais de nombreuses interrogations sont notables à leur sujet. Face aux problématiques environnementales et sanitaires qui s'expriment sur des temps longs, les limites et la lenteur de la transformation des pratiques sont d'autant plus notables qu'en ce qui concerne les problématiques socio-économiques. Cela confère un rôle de donneur d'alerte à la

communauté scientifique et interroge leur place dans la transformation des pratiques. La littérature concernant la diffusion de l'innovation, se penche sur ces questions essentiellement dans le cadre de la production ; mais des études se développent peu à peu en ce qui concerne les innovations sociales au sein desquels s'inscrivent avec pertinence les transformations de la gestion de l'eau en fonction d'objectifs sanitaires et environnementaux.

Enfin, même si elles ne permettent pas d'atteindre l'exhaustivité holistique (la sensibilité du sociosystème n'est par exemple pas abordée), la méthode interdisciplinaire adoptée dans cette étude génère des résultats intéressants en ce qui concerne le diagnostic de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau. A ce sujet, il est d'ailleurs notable que les deux analyses coïncident sur un tabou : celui de l'arsenic (et plus généralement celui de la contamination de l'eau). Mais malgré ces restrictions, l'association des approches quantitatives et qualitatives apparaît intéressante puisqu'elles permettent respectivement d'analyser l'exposition et les fragilités socio-économiques, et de détailler les fragilités sociales, culturelles et institutionnelles tout en considérant aussi les capacités d'adaptation du socio-système. En particulier, l'analyse des discours permet d'expliquer la surexploitation des aquifères à travers la complexité des dynamiques agricoles que l'IPE-SIG ne touche qu'en surface. En outre, cette analyse confirme l'importance de la communication relative aux facteurs physiques de pénuries en eau qui ne sont pas toujours visibles : sans elle, les mythes de l'abondance renforcent les tensions qui s'expriment localement. A Delicias, il apparaît que cette communication est limitée et la cristallisation des tensions sociales forment des cercles vicieux qui renforcent les pénuries.

Pour conclure, il apparaît que l'association de différentes échelles d'analyse permet d'aborder les différentes dimensions des vulnérabilités associées aux pénuries en eau et de réaliser un diagnostic d'autant plus riche. Mais il est notable que les interrogations associées à l'aide à la prise de décision restent importantes dans les deux approches. Afin de donner à ce diagnostic une forme synthétique (en accord avec les critères de l'aide à la prise de décision), les apports conjoints de l'IPE-SIG et de l'analyse qualitative à Delicias sont synthétisés dans une matrice AFFOM. Par-delà sa pertinence dans la région d'étude, le diagnostic multi-scalaire obtenu apporte des éléments de réponse intéressants au sujet des vulnérabilités liées aux pénuries en eau à Chihuahua, et fait même écho à certaines études portant sur d'autres territoires au Mexique. L'un des apports de cette recherche réside aussi dans la diversité

qu'elle signale dans l'Etat de Chihuahua : elle permet de relativiser sa singularité et son succès au sein des territoires mexicains.





## Bibliographie

- Abraham, E. M., Fusari, M. E., & Salomón, M. (2002). El Índice De Pobreza Hídrica Y Su Adaptación a Las Condiciones De América Latina. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Elena\\_Abraham/publication/228536202\\_EL\\_INDICE\\_DE\\_POBREZA\\_HIDRICA\\_Y\\_SU\\_ADAPTACION\\_A\\_LAS\\_CONDICIONES\\_DE\\_AMERICA\\_LATIN\\_A/links/57e7d29e08ae9e5e4558b8ed/EL-INDICE-DE-POBREZA-HIDRICA-Y-SU-ADAPTACION-A-LAS-CONDICIONES-DE-AMER](https://www.researchgate.net/profile/Elena_Abraham/publication/228536202_EL_INDICE_DE_POBREZA_HIDRICA_Y_SU_ADAPTACION_A_LAS_CONDICIONES_DE_AMERICA_LATIN_A/links/57e7d29e08ae9e5e4558b8ed/EL-INDICE-DE-POBREZA-HIDRICA-Y-SU-ADAPTACION-A-LAS-CONDICIONES-DE-AMER)
- Abraham, E. M., Fusari, M. E., Soria, N., & Salomón, M. (2005). *Utilización del Índice de Pobreza Hídrica como herramienta del Ordenamiento Territorial en zonas áridas. Mendoza (Argentina)*.
- Abrams, L. (2009). Water scarcity. *FAO Article*. Retrieved from [www.africanwater.org/drought\\_water\\_scarcity.htm](http://www.africanwater.org/drought_water_scarcity.htm)
- Abric, J.-C. (1994). *Pratiques sociales et représentations* (PUF). Paris.
- Adams, A. S. (2010). Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México Introducción.
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Alvarez Andrade, A. (2010). Gestion Políticas y Culturas Del Agua. In *Las interacciones agricultura-agua y la modificacion de los ambientes rurales: el caso del valle de Mexicali*.
- Albuquerque Llorens, F. (2008). Innovación, transferencia de conocimientos y desarrollo económico territorial: una política pendiente. *Arbor*, CLXXXIV(732), 687–700. <http://doi.org/10.3989/arbor.2008.i732.215>
- Allan, J. A. (2001). *The middle East water question. Hydro-politics and the global economy*. London.
- Angélie-Descamps, A., & Alarcón-Herrera, M. T. (2015). Des conflits socio-environnementaux aux vulnérabilités sociétales liés à l'eau au Mexique (Puebla-Chihuahua): Première approche par l'analyse de la Presse Quotidienne Régionale (PQR). *L'Ordinaire Des Amériques*, 218.
- Anju, A. M., Vicky, S. E., & Salij Kumar, P. J. (2017). Water poverty Analysis using Water Poverty Index ( WPI ) -A critical Review. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, (February). <http://doi.org/10.19080/IJESNR.2017.01.555569>
- Arreguin Cortés, F. I., Lopez Pérez, M., Rodriguez Lopez, O., & Montero Martinez, M. J. (2015). *Atlas*

*de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Juitepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved from [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/atlas-2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/atlas-2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf)

Audet, R. (2008). L'horizon interdisciplinaire de la sociologie de l'environnement sur le terrain de l'agriculture alternative ». *VertigO - La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*, 8(2). <http://doi.org/10.4000/vertigo.5534>

Avila Garcia, P. (2005). Uso de la biodiversidad y los recursos naturales. In L. E. Villasenor Gomez (Ed.), *Michoacan: Estudio de Estado* (CONABIO Go). México.

Avila, P. (2002). *Cambio global y recursos hidricos en México: hidropolitica y conflictos contemporaneos por el agua*. INECOL. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>

Avila, P. (2003). De la hidropolitica a la gestion sustentable del agua. In E. C. de Michoacan (Ed.), *Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI: Mexico desde una perspectiva global y regional*. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=kwzNB6LLILMC&oi=fnd&pg=PA15&dq=patricia+avila+Agua,+medio+ambiente+y+desarrollo+en+el+siglo+XXI&ots=qX5Ti2Cp7I&sig=PvmgrETpXBbgykFNZzJJrwm7YIg#v=onepage&q=patricia+avila+Agua&f=false>

Baba, H. M., Kasim, R., Usman, M. A., & Abdu, A. A. (2018). Analyzing Area-Based Rating Assessment Implementation in Bauchi Metropolis , Nigeria , Testing SWOT Variables, 3(1), 59–68.

Babut, M., Arts, G. H., Barra Caracciolo, A., Carluer, N., Domange, N., Friberg, N., ... Vindimian, E. (2013). Pesticide risk assessment and management in a globally changing world-report from a European interdisciplinary workshop. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8298–8312. <http://doi.org/10.1007/s11356-013-2004-3>

Balcáza, M., & Pasquet, P. (2009). Dieta , actividad física y estado de nutrición en escolares tarahumaras , México, 13(1), 30–37.

Banque Mondiale. (2013). State Worlds children SOWC\_2013\_Table\_1\_EFS. Retrieved from [https://www.unicef.org/sowc2013/files/Stat\\_Tables\\_SWCR2013\\_ENGLISH.pdf](https://www.unicef.org/sowc2013/files/Stat_Tables_SWCR2013_ENGLISH.pdf)

Banque Mondiale. (2016). Indicateurs du développement dans le monde. Retrieved from <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SI.POV.GINI?end=2016&start=2016&view=bar>

Bardin, L. (1977). *L'analyse de contenu* (PUF). Paris.

- Becerra, S. (2012). Vulnérabilité, risques et environnement: l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *VertigO - La Revue Électronique En Sciences de l'Environnement*, 12. Retrieved from <http://vertigo.revues.org/11988>
- Becerra, S., & Peltier, A. (2009). *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés* (L'Harmatta). Paris: Sociologies et environnement.
- Béchillon, D. (de). (1997). La notion de transdisciplinarité. *Revue Du Mauss*, 10.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14(83), 32–35. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Juan\\_Schmitter-Soto/publication/228984086\\_Los\\_cenotes\\_de\\_la\\_Peninsula\\_de\\_Yucatan/links/09e4150f877bc7ee49000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juan_Schmitter-Soto/publication/228984086_Los_cenotes_de_la_Peninsula_de_Yucatan/links/09e4150f877bc7ee49000000.pdf)
- Berkes, F., & Folke, C. (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for building Resilience*. (C. U. Press, Ed.). Cambridge, UK. Retrieved from [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=XixuNvX2zLwC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Berkes,+F.+et+C.+Folke+\(Eds.\),+1998,+Linking+Social+and+Ecological+Systems:+Management+Practices+and+Social+Mechanisms+for+Building+Resilience,+Cambridge+University+Press,+Cambridge](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=XixuNvX2zLwC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Berkes,+F.+et+C.+Folke+(Eds.),+1998,+Linking+Social+and+Ecological+Systems:+Management+Practices+and+Social+Mechanisms+for+Building+Resilience,+Cambridge+University+Press,+Cambridge)
- Berthier, N. (2006). *Les techniques d'enquête en sciences sociales. Méthode et exercices corrigés* (Arman Coli). Paris.
- Bertrand, M. (2007). Géographie et représentations : De la nécessité des méthodes qualitatives, 316–334.
- Birkmann, J. (2007). Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 7(1), 20–31. <http://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002>
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreno, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., ... Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), 193–211. <http://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>
- Blanchet, A. (1985). Interviewer. In *Les techniques d'enquête en sciences sociales: observer, interviewer, questionner* (Dunod, pp. 81–126).
- Blanchon, D. (2013). *Atlas Mondial de l'eau: défendre et partager notre bien commun* (Ed. Autrem). Paris: Collection Atlas-monde.
- Blot, F. (2005). *Discours et pratiques autour du « développement durable » et des « ressources en eau », Une approche relationnelle appliquée aux bassins d'Adour-Garonne et du Segura*. Université de

Toulouse 2 le Mirail, Ecole Nationale de Formation Agronomique, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse.

- Blot, F., Peltier, A., Antoine, J., Leroy, D., Maire, E., Elena, L., ... Elena, L. (2015). Vulnérabilités liées à l'eau dans les Andes vénézuéliennes : influences des relations sociétés/hydrosystèmes dans le cas de Santa-Cruz-de-Mora. *L'Ordinaire Des Amériques*, 218. Retrieved from <http://orda.revues.org/1905>
- Bogardi, J. J. (2004). Hazards, risks and vulnerabilities in a changing environment: The unexpected onslaught on human security? *Global Environmental Change*, 14(4), 361–365. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.002>
- Buchs, A. (2010). La construction sociale de la pénurie en eau à Almeria (Andalousie) ou l'échec de la normalisation "hydrauliciste." *Economie Appliquée*, LXIII(n°3).
- Buchs, A. (2012). *Comprendre la pénurie en eau comme un phénomène social : un panorama des approches* (Vol. "Informati).
- Bues, R., Bussièrès, P., Dadomo, M., Dumas, Y., Garcia-Pomar, M. I., & Lyannaz, J. P. (2004). Assessing the environmental impacts of pesticides used on processing tomato crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102(2), 155–162. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2003.08.007>
- Busso, G. (2001). Vulnerabilidad social: nociones e implicancias de políticas para latinoamerica a inicios del siglo xxi. In *Seminario internacional, Lasdiferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe*.
- Campos Cabral, V., & Ramirez Juarez, J. (2009). Conflictos por el agua en el Municipio de Nealtican y la junta Auxiliar de Francisco Ocotlan, Puebla. In *La gestion de los recursos hidricos. Realidades y perspectivas. Tomo II*.
- Carlos, J., & Aguilar, E. (2014). Programa de Desarrollo de Capacidades, Innovacion, tecnologia y Extensionismo Rural.
- Castelazo, A. H., Mendoza, J. A. S. P., Solis, S. S., Córdova, G., & Quevedo, H. (2007). Incorporacion de la vulnerabilidad a las inundaciones al Indice de Pobreza del agua en el municipio de Juarez. *Culcyt, Vulnerabilidad*, (23), 31–50.
- Centofanti, T., Hollis, J. M., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Truckell, I., Dubus, I. G., & Reichenberger, S. (2008). Development of agro-environmental scenarios to support pesticide risk assessment in Europe. *Science of the Total Environment*, 407(1), 574–588. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.017>

- Cervantes Martínez, A. (2007). El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatan. *Teoría y Praxis*, 3, 143–152.
- Chabrillat, S. (2015). Land Degradation Indicators : Spectral indices Land Degradation Indicators : Spectral indices, 45(August), 331–354.
- Chenoweth, J. (2008). A re-assessment of indicators of national water scarcity. *Water International*, 33, 5–18.
- Chiclana, F., Herrera-Viedma, E., Herrera, F., & Alonso, S. (2007). Some induced ordered weighted averaging operators and their use for solving group decision-making problems based on fuzzy preference relations. *European Journal of Operational Research*, 182(Elsevier), 383–399. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.032>
- Cho, D., Ogwang, T., & Opio, C. (2010). Simplifying the Water Poverty Index. *Social Indicators Research*, 95, 257–267. Retrieved from doi:10.1007/s11205-009-9501-2.
- Colet, R., & Mary, N. (1993). *Pluridisciplinarité, interdisciplinarité, transdisciplinarité : quelles perspectives en éducation ? Etude du discours des professeurs de la Section des sciences de l'éducation de l'Université de Genève*. (F. de psychologie et des sciences de l'éducation Université de Genève, Ed.) (Cahier n°7). Genève.
- CONABIO. (2012). Portal de geoinformacion. Sistema Nacional de informacion sobre biodiversidad. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2014). División política estatal, escala 1:250000. modificado de Conjunto de datos vecotriales y toponimia de la carta topográfica. Serie III. Insituto Nacional de Estadística, Geografía e Información. Mexico. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/dest\\_2012gw.png](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/dest_2012gw.png)
- CONAGUA. (2001). *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*.
- CONAGUA. (2002). Síntesis del Programa de Modernización y Tecnificación de los Distritos de Riego del Río Conchos.
- CONAGUA. (2010a). Capítulo 4. Infraestructura hidráulica. In *Estadística del Agua en México*.
- CONAGUA. (2010b). Cubos de usos del agua. Usos por entidad federativa. Mexico.
- CONAGUA. (2012). *Libro Blanco CONAGUA-02. Rehabilitacion, Modernizacion y equipamiento de los Distritos de Riego*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS BLANCOS/CONAGUA-02 Rehabilitación, modernización y equipamiento de los Distritos de Riego.pdf>

- CONAGUA. (2014a). Estadísticas del Agua en México. *Conagua, 2014*, 242. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- CONAGUA. (2014b). *Reseña presentación CONAGUA*.
- CONAGUA. (2015a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ceballos (1023), Estado Durango*.
- CONAGUA. (2015b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), Estado de Chihuahua*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CONAGUA. (2015c). Disponibilidad por Acuíferos. Retrieved from <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/chihuahua-74904>
- CONAGUA. (2015d). Índice de Calidad del Agua, SUP\_2010\_15C. Retrieved from <https://www.gob.mx/conagua/documentos/monitoreo-de-la-calidad-del-agua-en-mexico>
- CONAGUA. (2015e). Plan director para la rehabilitación modernización, tecnificación y equipamiento de las ‘unidades de riego de los municipios de Rosales, Meoqui, Julimes, Estado de Chihuahua Sociedad de Responsabilidad limitada de interés público de capital variable.
- CONAGUA. (2016a). Dirección local Chihuahua diagnóstico sobre el agua subterránea en Chihuahua.
- CONAGUA. (2016b). Monitoreo de calidad del agua. *Subdirección General Técnica Gerencia de Calidad Del Agua*.
- CONAGUA. (2016c). Sistema de Información Nacional del Agua (SINA). Retrieved from <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- CONAGUA. (2018). Datos Abiertos del Gobierno de la República. Retrieved from <https://datos.gob.mx/busca/organization/conagua?page=1>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Ciudad de México. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf)
- CONAPO. (2010). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio*.
- CONEVAL. (2010a). Indicadores de cohesión social según municipio.
- CONEVAL. (2010b). *Ingreso Corriente Total Per Capita*. Retrieved from <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Medicion-de-la-pobreza-municipal-2010.aspx>
- CONEVAL. (2014). *Metodología para la medición multidimensional de la pobreza en México*. México, DF. Retrieved from <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Medicion-de-la-pobreza-municipal-2010.aspx>

- CONEVAL. (2016). Medición de la Pobreza. Retrieved from <https://coneval.org.mx/Medicion/Paginas/PobrezaInicio.aspx>
- Couvet, D. (2015). *Ecologie , Biodiversité : pertinence de la notion de socio-écosystème Notion de socio-écosystème*. Retrieved from <http://wp.unil.ch/tim/files/2015/01/Denis-Couvet.pdf>
- Crozier, M., & Friedberg, E. (1977). *L'acteur et le système* (Ed. du Seu). Paris.
- Cullis, J. (2005). *Water Poverty mapping: development and introduction using a case study at the local municipal scale for the Eastern Cape*. Water Research Comission.
- Cullis, J., & Gorgens, A. (2006). WATER POVERTY MAPPING AS A TOOL FOR THE EFFECTIVE ALLOCATION OF RESOURCE TO ADDRESS WATER POVERTY IN SOUTH AFRICA. In *WISA Biennial Conference and Exhibition*. Durban, South Africa. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/228471195\\_WATER\\_POVERTY\\_MAPPING\\_AS\\_A\\_TOOL\\_FOR\\_THE\\_EFFECTIVE\\_ALLOCATION\\_OF\\_RESOURCE\\_TO\\_ADDRESS\\_WATER\\_POVERTY\\_IN\\_SOUTH\\_AFRICA](https://www.researchgate.net/publication/228471195_WATER_POVERTY_MAPPING_AS_A_TOOL_FOR_THE_EFFECTIVE_ALLOCATION_OF_RESOURCE_TO_ADDRESS_WATER_POVERTY_IN_SOUTH_AFRICA)
- Cullis, J., & O'Regan, D. (2004). Targeting the water-poor through water poverty mapping. *Water Policy*, 6, 397–411.
- D'Ercole, R., Thouret, J., Dollfus, O., & Asté, J. (1998). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse.
- Damaris, L., Vota, A., María, A., Adriana, O., Díaz, L., César, J., ... Pecanero, N. (2010). ANÁLISIS FODA Y PERSPECTIVAS DEL CULTIVO DEL NOGAL PECANERO EN CHIHUAHUA. *Redalyc*.
- Darío Cardona, O. (2001). LA NECESIDAD DE REPENSAR DE MANERA HOLISTICA LOS CONCEPTOS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO “Una Crítica y una Revisión Necesaria para la Gestión.”
- Daupras, F. (2015). *Envisager la Vigilance crues comme système organisationnel: les conditions de sa robustesse en territoires inondés dans le bassin Adour-Garonne (Sud-Ouest de la France)*. Université Toulouse - Jean Jaurès. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Del Castillo, L., Oré, M. T., Van Orsel, S., & Vos, J. (2009). *El agua ante nuevos desafíos, actores e iniciativas en Ecuador, Peru y Bolivia*. (O. International, Ed.) (Internatio). Lima.
- Desai, M. (1995). *Poverty, famine and economic development*.
- Descroix, L., & Lasserre, F. (2007). Or bleu et grands ensembles économiques: une redéfinition en cours des rapports de force interétatiques? *Revue Internationale et Stratégique*, n°66(2), 93–104.



<http://doi.org/10.3917/ris.066.0093>

- Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., & Saint-Paul, L. (2003). L'Approche systémique: de quoi s'agit-il? *Afscet*, 1–11. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:L'Approche+systémique+:+de+quoi+s'agit-il+?#0>
- Dozal, S. R., Alarcón-Herrera, M. T., Cifuentes, E., Barraza, A., Rodríguez, J. L., & Sanin, L. (2005). Dental fluorosis in rural communities of Chihuahua, Mexico. *Fluoride*, 38(2), 143–150.
- Durand, D. (1979). *La systémique*. (PUF, Ed.) (Que sais-j). Paris, France.
- Eakin, H. (2003). The Social Vulnerability of Irrigated Vegetable Farming Households in Central Puebla. *The Journal of Environment & Development*, 12, 414–429. <http://doi.org/10.1177/1070496503257733>
- Eakin, H. (2005). Institutional change, climate risk, and rural vulnerability: Cases from Central Mexico. *World Development*, 33(11), 1923–1938. <http://doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.06.005>
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Manual*.
- Eastman, J. R., Kyem, P. A. K., Toledano, J., & Weigen, J. (1993). Explorations in geographic systems technology. *GIS and Decision Making*, 4.
- Eastman, R., Jin, W., Kyem, P. A. K., & Toledano, J. (1995). Raster Procedures for multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(5), 539–547.
- Echeverría, J. (2008a). Apropiación social de las tecnologías de la información y la comunicación. *Revista CTS*, 4, 11.
- Echeverría, J. (2008b). El manual de Oslo y la innovación social. *S*, CLXXXIV(732), 609–618. <http://doi.org/10.3989/arbor.2008.i732.210>
- El-gafy, I. K. E. (2018). The water poverty index as an assistant tool for drawing strategies of the Egyptian water sector. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(2), 173–186. <http://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.008>
- Enrique J., J., Manuel, M., & Victor H., R.-M. (2013). *La investigación ecologica a largo plazo en México*. Universidad de Guadalajara. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Enrique, R., Caravantes, D., Carlos, L., Peña, B., Carlos, L., Cejudo, A., & Flores, E. S. (2014). Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc , Chihuahua . Un estudio socioambiental en el norte de México Geospatial analysis of land use and water interaction in the peri-urban area of Cuauh. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del*

- Instituto de Geografía*, 2014(83), 116–130. <http://doi.org/10.14350/rig.32694>
- Ernesto, L., & Gómez, C. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez , Chihuahua. *Estudios Fronterizos*, 8(16), 9–41.
- Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y., & Herrera-Pedraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua Vol. III, No. 1, III(1)*, 8–18.
- ESRI. (2010). *ArcGis\_Help*.
- Estados Unidos Mexicanos. (1944). Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre Los Estados Unidos Mexicanos y Estados Unidos Americanos, 1–22.
- Estados Unidos Mexicanos. (2000). Norma Oficial Mexicana, NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. DOF.
- Estados Unidos Mexicanos. (2011). Ley de Aguas Nacionales. Retrieved from [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_240316.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf)
- Falconer, K. (2002). Pesticide environmental indicators and environmental policy. *J Environ Manage*, 65(3), 285–300. <http://doi.org/10.1006/jema.2002.0550>
- Falkenmark, M. (1986). Fresh water-time for a modified approach. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 15(4), 192–200.
- Falkenmark, M. (1989). The massive water scarcity now Threatening Africa: Why isn't it being addressed. *Ambio*, 18 (2), 112–118.
- FAO. (2012). Faire face à la pénurie d ' eau. Un cadre d'action pour l'agriculture et la sécurité alimentaire. In *FAO Rapports sur l'eau* (p. 78). <http://doi.org/10.1109/ARIS.2014.6871494>
- Feitelson, E., & Chenoweth, J. (2002). Water poverty: towards a meaningful indicator. *Water Policy*, 4, 263–281.
- Fenwick, C. (2010). *Identifying the water poor: an indicator approach to assessing water poverty in rural Mexico*. Retrieved from <http://discovery.ucl.ac.uk/708398/>
- Finizio, A., & Villa, S. (2002). Environmental risk assessment for pesticides. *Environmental Impact Assessment Review*, 22(3), 235–248. [http://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00002-1](http://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00002-1)
- Flaus, J., Bertheliern, E., & Giannoccaro, F. (2010). Modelisation De Systemes Organisationnels Pour L ' Analyse Des Defaillances : Application Au Plan De Sauvegarde Communal. *Simulation*, 8–13.
- Flipe, F. (2005). Pour une écologisation du concept de capacité d'Amartya Sen. *Natures Sciences*

*Sociétés*, 13(1), 68–75. <http://doi.org/10.1051/nss>

- Flores, M. C., & Glez, J. W. R. (2015). *Distribucion de la poblacion por Tamaño de Localidad y su Relación con el Medio Ambiente*.
- Fontan, J., & Tremblay, J. K. D. (2004). L'innovation Innovation et société : pour élargir l'analyse des effets territoriaux de l'innovation. *Géographie, Lavoisier Société, Économie*, 6(1295–926x), 115–128. <http://doi.org/10.3166/ges.6.115-128>
- Forouzani, M., & Karami, E. (2010). Agricultural water poverty index and sustainability. <http://doi.org/10.19080/IJESNR.2017.01.555569>
- Forouzani, M., & Karami, E. (2011). Agricultural water poverty index and sustainability. *Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA*, 31(2), 415–431.
- Frenken, K. (2005). *L'irrigation en Afrique en chiffres*.
- Gaona-Vizcayno, S., Gordillo-de-Anda, T., & Villasuso-Pino, M. (1980). Cenotes, karst característico: Mecanismos de formación. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*. Retrieved from [http://satori.geociencias.unam.mx/4-1/\(4\)Gaona.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/4-1/(4)Gaona.pdf)
- García, E. (1998). Climas (Clasificación de Köppen modificado por García). Escala 1:1 000 000. México. In CONABIO. CONABIO. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana)* (Instituto).
- Garriga, R. G., & Foguet, A. P. (2010a). Improved Method to Calculate a Water Poverty Index at Local Scale. *Journal of Environmental Engineering*, 136, 1287–1298. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000255](http://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000255)
- Garriga, R. G., & Foguet, A. P. (2010b). THE ENHANCED WATER POVERTY INDEX : TARGETING THE WATER POOR AT DIFFERENT SCALES. In *WISA Biennial Conference. "WISA 2010 Biennial Conference."* Durban, South Africa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/9752>
- Giné Garriga, A., & Pérez-Fouget, A. (2008). Enhancing the water poverty index: Towards a meaningful indicator. In *IV Congrés Universitat I Cooperació al Desenvolupament*.
- Giné Garriga, R., & Pérez-Fouget, A. (2015). The Water Poverty Index: assessing water scarcity at different scales. In *II Congrés UPC Sostenible 2015*.
- Giné, R. (2009). Enhancing sector data management to target the water poor.
- Gleick, P. H. (1996). Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, 21(JUNE 1996), 83–92. <http://doi.org/10.1080/02508069608686494>

- Gobierno del Estado, C. (2011). *Programa sectorial 2011-2016. El agua de Chihuahua*. Retrieved from [http://chihuahua.gob.mx/atach2/sf/uploads/indtfisc/progSER2010-2016/ProgSec\\_JuntaCentral.pdf](http://chihuahua.gob.mx/atach2/sf/uploads/indtfisc/progSER2010-2016/ProgSec_JuntaCentral.pdf)
- Gobierno del Estado, C. (2017). *Plan Estatal de desarrollo. Chihuahua 2017 - 2021*. Retrieved from [http://www.chihuahua.gob.mx/planestatal/PLAN\\_ESTATAL\\_DE\\_DESARROLLO.pdf](http://www.chihuahua.gob.mx/planestatal/PLAN_ESTATAL_DE_DESARROLLO.pdf)
- Gong, L., Jin, C. L., Li, Y. X., & Zhou, Z. L. (2017). A novel water poverty index model for evaluation of Chinese regional water security. *International Conference on Water Resource and Environment*. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/82/1/012029/pdf>
- Greimas, A. J. (1976). *Sémiotique des Sciences Sociales* (Seuil). Paris.
- GTZ. (2003). *Analisis De Amenazas Y Vulnerabilidad Subcuenca Alta San Pedro - Norte Potosi*. San Pedro, Bolivia.
- Gutiérrez C, L. E. (2007). Potencial de desarrollo y gestion de la politica regional El caso de Chihuahua. *Frontera Norte*, 9(18), 7–36.
- GWP, G. W. P. (2000). *Integrated Water Resources Management* (No. 4). *Technical Advisory Commitee Background Paper Series*. Stockholm. <http://doi.org/10.2166/wst.2010.262>
- Heidecke, C. (2006). Development and evaluation of a regional water poverty index for Benin. *International Food Policy Research Institute. Sustainable Solutions for Ending Hunger and Poverty*, 1–55. Retrieved from <https://ageconsearch.umn.edu/bitstream/55413/2/eptdp145.pdf>
- Heijs, J. (2001). Sistemas nacionales y regionales de innovación y política tecnológica: una aproximación teórica, 67. Retrieved from <http://eprints.ucm.es/6757/1/24-01.pdf>
- Hernández-Garcia, Y., Sosa-Cerecedo, M., Moreno, M., Alcala, J., & Puga, S. (2008). Evaluación de la contaminación por metales pesados y arsénico en sedimento en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 89–94. Retrieved from <http://guaymas.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v4-n2-7-evaluacion-de-la-contaminacion-por-metales-pesados.pdf>
- Hernandez Garcia, L. Q. Y. G. (2007). *Metales Pesados y arsénico en agua y sedimento de embalses artificiales del Estado de Chihuahua, México*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hernandez Veleros, Z. S., De la Merced, G. D., & Amador Ambriz, C. (2011). Fundamento metodológico , discrepancias estadísticas y errores conceptuales en el uso de datos económicos, 71–110.
- Hill, T., & Westbrook, R. (1974). SWOT Analysis: It's time for a product recall. *Science*, 183(130), 1198–1200. [http://doi.org/10.1016/S0024-6301\(96\)00095-7](http://doi.org/10.1016/S0024-6301(96)00095-7)

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Febrero 2011*. <http://doi.org/978-1-84971-279-8>
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). Domestic Water Quantity , Service Level and Health. *World Health Organization*, 39. <http://doi.org/10.1128/JB.187.23.8156>
- Huang, S., Feng, Q., Lu, Z., Wen, X., & Deo, R. C. (2017). Trend Analysis of Water Poverty Index for Assessment of Water Stress and Water Management Policies : A Case Study in the Hexi Corridor , China. <http://doi.org/10.3390/su9050756>
- INEGI. (1998). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetacion, escala 1:250 000, Serie I (capa union).
- INEGI. (1999). *Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación*. México.
- INEGI. (2000). Censo general de población y vivienda 2000. Estructura de la tabla FD ITER2000. Marco Geoestadístico.
- INEGI. (2005a). Censo general de población y vivienda 2005. Estructura de la tabla FD ITER2005.Marco Geoestadístico.
- INEGI. (2005b). Censo general de población y vivienda 2005. ITER\_08XLS05.
- INEGI. (2005c). División política municipal, escala 1:250000. Mexico. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/muni\\_2005gw.png](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/muni_2005gw.png)
- INEGI. (2007). EL VIII CENSO AGRÍCOLA , GANADERO Y FORESTAL Aspectos metodológicos y principales resultados. México.
- INEGI. (2009a). *Censo economico: industrias y minas*.
- INEGI. (2009b). *Metodologia de los Censos Económicos*.
- INEGI. (2010a). *Censo de Población y Vivienda. Principales Resultados por Localidad*.
- INEGI. (2010b). *Censo general de población y vivienda 2010. ITER\_08XLS10*.
- INEGI. (2013a). Censos y Conteos de población y viviendas. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/cpvsh/>
- INEGI. (2013b). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetacion, escala 1:250 000, Serie V (capa union). Aguascalientes: INEGI. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s5ugw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html\\_xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s5ugw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no)
- INEGI. (2014a). Guia para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V, 195. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- INEGI. (2014b). *Perspectiva estadística Chihuahua*.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015. Marco Geoestadístico Nacional*.
- INEGI. (2018). Sistema Municipal de Bases de Datos (SIMBAD). Retrieved from [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/simbad/default.asp?c=73](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/simbad/default.asp?c=73)
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–151.
- Jackson, S. E., Joshi, A., & Erhardt, N. L. (2003). Recent research on team and organizational diversity: SWOT analysis and implications. *Journal of Management*, 29(801). [http://doi.org/10.1016/S0149-2063\\_03\\_00080-1](http://doi.org/10.1016/S0149-2063_03_00080-1)
- Jemmali, H. (2013). Mesures de la pauvreté en eau: analyse comparative et développement de l'indice de pauvreté en eau. *VertigO - La Revue Électronique En Sciences de l'Environnement*, 13.
- Jemmali, H., & Matoussi, M. S. (2013). A multidimensional analysis of water poverty at local scale: Application of improved water poverty index for Tunisia. *Water Policy*, 15(1), 98–115. <http://doi.org/10.2166/wp.2012.043>
- Jemmali, H., & Salah Matoussi, M. (2012). A Mutlidimensional Analysis of Water Poverty at Local Scale: Application of Improved Water Poverty Index for Tunisia. *Corruption and Economic Development ERF 18th Annual Conference*, 33.
- Jiang, H., & Eastman, J. R. (2010). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14:2, 173–184. <http://doi.org/10.1080/136588100240903>
- Jianguao, W., & John, L. D. (2002). A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 153, 7–26. [http://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90274-X](http://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90274-X)
- Jimenez Cisneros, B. (2008). Calidad del agua en Mexico: principales retos. In *El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas*.
- Jiménez González, G. El Valle de Ojinaga : en la junta del Bajo Conchos y el Bravo (2004).
- Jiménez Roman, A., & Maderey-R., L. E. (1992). Escurrimiento medio anual. Escala 1:4000000. In *Hidrogeografía. Tomo II. Seccion IV, 6.4. Atlas Nacional de México (1990-1992)*.
- Joerin, F., & Musy, A. (2000). Land Management with GIS and multicriteria analysis. *International Transactions on Operation Research*, 7, 67–68.
- Kauffer, E. (2006). Le Mexique et l'eau: de la disponibilité naturelle aux différents types de rareté.

*Géocarrefour*, 81/1. Retrieved from <http://geocarrefour.revues.org/1784>

- Kauffmann, J. C. (2011). *L'entretien compréhensif*. (Arman Colin, Ed.) (Troisième). Paris.
- Kim, L. (2000). La dinámica del aprendizaje tecnológico en la industrialización Linsu Kim 1.
- Komnienic, V., Ahlers, R., & Van der Zaag, P. (2009). Assessing the usefulness of the water poverty index by applying it to a special case: Can one be water poor with high levelsof access? *Phys and Chem of the Earth*, 34, 219–224.
- Krause, P., & Boyle, D. P. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, 89–97.
- Kron, W. (2003). High water and floods: resist them or accept them. *Schadenspiegel (Losses and Loss Prevention)* 46 Th Year, 3(Munich Re Group), 26–34.
- L'Harmattan (Ed.). (n.d.). De la vulnérabilité à la résilience une approche par les capacités de la gestion des risques. Paris.
- Lacoste, Y. (2010). *L'eau dans le monde: les batailles pour la vie* (Larousse). Paris.
- Lallau, B. (2008). De la vulnérabilité à la résilience : une approche par les capacités de la gestion des risques. *Risques et Environnement : Recherches Interdisciplinaires Sur La Vulnérabilité Des Sociétés*, 2008/1(1), 171–183. <http://doi.org/10.3917/rfse.001.0177>
- Laperrière, H., & Zuniga, R. (2006). Le regard qualitatif et le dépassement des frontières sectorielles et des filtres idéologiques. In F. Guillemette & C. Baribeau (Eds.), *Recherche qualitative en sciences humaines et sociales: les questions de l'heure* (Vol. 5, pp. 46–69). Montréal.
- Larousse. (2019). Dictionnaire de français. In *Larousse*. Retrieved from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>
- Lascoumes, P., & Le Galès, P. (2005). Gouverner par les cartes. *Genèses*, 68. <http://doi.org/10.1017/S0008423906339984>
- Lasserre, F. (2007). Conflits hydrauliques et guerres de l'eau : un essai de modélisation. *Revue Internationale et Stratégique*, 66(2), 105. <http://doi.org/10.3917/ris.066.0105>
- Lavie, E., Hévin, J.-E., & Le Drezen, Y. (2016). Accès à l'eau potable, problèmes de gouvernance et vulnérabilités : le cas de la municipalité de Las Heras (agglomération de Mendoza, Argentine). *L'Ordinaire Des Amériques*, 218(2015).
- Lawrence, P., Meigh, J., & Sullivan, C. (2003). The Water Poverty Index : an International Comparison. *Keele Economics Research Papers*, 19. Retrieved from [www.keele.ac.uk/depts/ec/web/wpapers/kerp0219.pdf](http://www.keele.ac.uk/depts/ec/web/wpapers/kerp0219.pdf)

- Legarreta, R., Rafael, M., Cuéllar, J., Luis, J., Rafael, M., Juan, R., ... Centro, Z. (2002). Impacto Ambiental del Uso de Plaguicidas en Huertos de Manzano del Noroeste de Chihuahua , México.
- Lemieux, V. (1991). Réseaux et appareils. Logique des systèmes et langage des graphes. Retrieved from [http://classiques.uqac.ca/contemporains/lemieux\\_vincent/reseaux\\_et\\_appareils/reseaux\\_et\\_appareils.pdf](http://classiques.uqac.ca/contemporains/lemieux_vincent/reseaux_et_appareils/reseaux_et_appareils.pdf)
- Leone, F. (2007). *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes “naturelles”: contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*. Université Paul Valéry - Montpellier III, Laboratoire GESTER, Montpellier.
- Leone, F., & Vinet, F. (2006a). La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. In *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles* (Georisques).
- Leone, F., & Vinet, F. (2006b). *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques* (Géorisque).
- Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D. J., & Green, A. (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22 (4)(January), 1050–1064.
- Li, X., Wan, J., & Jia, J. (2011). Application of the Water Poverty Index at the Districts of Yellow River Basin. *Advanced Materials Research*, 250–253, 3469–3474. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3469>
- Lopez-Calva, L. F., Rodriguez-Chamussy, L., & Székely, M. (2004). *Medición del Desarrollo Humano en México. PNUD México*. México.
- López Álvarez, B., Ramos Leal, J. A., Santacruz, G., Morán Ramírez, J., Noyola Medrano, M. C., & Pineda Martínez, L. F. (2013). Calculo del Indice de pobreza del agua en zonas semi-aridas: caso valle de San Luis Potosi. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 29(4), 249–260.
- López Álvarez, B., Santacruz de Leon, G., Ramos Leal, J. A., & Morán Ramírez, J. (2015). Water Poverty Index in Subtropical Zones: The case of Huasteca Potosina, Mexico. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 31(2), 173–184.
- Louvel, S. (2015). Ce que l'interdisciplinarité fait aux disciplines. Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie. *Revue Française de Sociologie*, 56, 75–103. <http://doi.org/10.3917/rfs.561.0075>



- Lujan Alvarez, C. (2003). *PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN Y TECNIFICACIÓN DEL DISTRITO DE RIEGO 005 DELICIAS, CHIHUAHUA, MÉXICO: Procesos de Certificación, Participación Pública y Aprobación del Programa por Usuarios*.
- Lutoff, C., Guéguen, P., & Davoine, P.-A. (2007). Vulnerable : L ' enquête au service de l ' évaluation des vulnérabilités sismiques en milieu urbain . L ' exemple de Grenoble. In AFPS (Ed.), *7ème Colloque National AFPS* (pp. 1–9). Paris.
- Maestriperi, N. (2012). *Dynamiquesspatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective*. Université de Toulouse 2 Le Mirail.
- Magaña Rueda, V. O., Vargas Huipe, N., Galguera Rosas, G., & Neri, C. (2012). *Estudio para sistematizar propuesta metodológica de Análisis de Vulnerabilidad bajo CC*. Retrieved from [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012\\_est\\_prop\\_met\\_vul\\_cc.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_est_prop_met_vul_cc.pdf)
- Maheswari, U., Sandeep, B., & Chaithanya Sudha, M. (2017). Water Poverty Index as a water management tool – A micro level study in Water Poverty Index as a water management tool – A micro level study in Tami Nadu, India. In *6th International Conference on Water & Flood Management (ICWFM-2017)*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/320559280\\_Water\\_Poverty\\_Index\\_as\\_a\\_water\\_management\\_tool\\_-\\_A\\_micro\\_level\\_study\\_in\\_Tamil\\_Nadu\\_India](https://www.researchgate.net/publication/320559280_Water_Poverty_Index_as_a_water_management_tool_-_A_micro_level_study_in_Tamil_Nadu_India)
- Manandhar, S., Pandey, V. P., & Kazama, F. (2012). Application of Water Poverty Index (WPI) in Nepalese Context: A Case Study of Kali Gandaki River Basin (KGRB). *Water Resources Management*, 26(1), 89–107. <http://doi.org/10.1007/s11269-011-9907-x>
- Mayer, D. G. (1993). Statistical validation, 68, 21–32.
- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being*.
- Meza Moreno, J. A. (2012). *Economía y desarrollo en Chihuahua, México. Una propuesta de análisis regional*. Ciudad Juarez.
- Mlote, S. D. M., Sullivan, C., & Meigh, J. (2002). Water Poverty Index : a Tool for Integrated Water Management, (October), 30–31.
- Molle, F., & Mollinga, P. (2003). Water poverty indicators : conceptual problems and policy issues. *Water Policy*, 5, 529–544.
- Monárrez, J., & Martínez, H. (2000). Prevalencia de desnutrición en niños tarahumaras menores de cinco años en el municipio de Guachochi , Chihuahua, 42(1).

- Moscovici, S. (1961). *La psychanalyse, son image et son public* (PUF). Paris.
- Moscovici, S. (2003). 2. Des représentations collectives aux représentations sociales : éléments pour une histoire. *Les Représentations Sociales*, 79. <http://doi.org/10.3917/puf.jodel.2003.01.0079>
- Muxart, T., Vivien, F., Villalba, B., Burnouf, J., Blanchemanche, P., Berger, J., ... Raynaud, C. (2003). *Des milieux et des hommes : fragments d 'histoires croisées*. Elsevier.
- Nihila, A. (2012). Water Poverty Index Mapping and Gis-Based Approach for Identifying Potential Water Harvesting Sites. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience*, 2(3), 1–11. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Vinod\\_T\\_r/publication/277351010\\_WATER\\_POVERTY\\_INDEX\\_MAPPING\\_AND\\_GIS-BASED\\_APPROACH\\_FOR\\_IDENTIFYING\\_POTENTIAL\\_WATER\\_HARVESTING\\_SITES/links/5569996708aefcb861d5e329/WATER-POVERTY-INDEX-MAPPING-AND-GIS-BASED-APPROACH-FOR-](https://www.researchgate.net/profile/Vinod_T_r/publication/277351010_WATER_POVERTY_INDEX_MAPPING_AND_GIS-BASED_APPROACH_FOR_IDENTIFYING_POTENTIAL_WATER_HARVESTING_SITES/links/5569996708aefcb861d5e329/WATER-POVERTY-INDEX-MAPPING-AND-GIS-BASED-APPROACH-FOR-)
- Nuñez López, D., Reyes-Gómez, V. M., Gutiérrez, M., Alarcón-Herrera, M. T., & Maganda-Ramírez, M. C. (2015). Analisis de Cambio de Uso de Suelo en una region representativa del Desierto.
- Ocampo-Fletes, I. (1994). *Importancia social y economica de la produccion horticola, en un sistema de pequena irrigacion con aguas contaminadas, el caso del Canal Santa Lucia, Puebla*. Colegio de Posgraduados, Campus Puebla.
- Ocampo-Fletes, I. (2004). *Gestion y sustentabilidad de los sistemas de pequeno riego. El caso del canal de San Félix, Atlixco, México*. Colegio de Postgraduados Campus Puebla.
- OECD, & JRC. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and user guide*. Retrieved from <http://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>
- Ohlsson, L., & Turton, A. R. (1999). The turning of a screw: Social resource scarcity as a bottle-neck in adaptation to water scarcity. *MEWREW Occasional Paper, Water Issu*(n°19).
- Olmos Marquez, M. A., & Alarcón-Herrera, M. T. (2014). ENVIRONMENTAL IMPACT BY THE USE OF REVERSE OSMOSIS IN ARSENIC REMOVAL TO OBTAIN DRINKING WATER. *Revista Ambiental*, 5(1), 1–5. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Olvera-Salgado, M. D., Bahena-Delgado, G., Alpuche-García, Ó., & García-Matías, F. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos . Estudio de caso en Chihuahua , México \* The Technification of Irrigation before the Water Shortage for the Generation of Food . Case Study in La technologie d ' arrosage.

<http://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea>

- Olvera-Salgado, M. D., Ojeda Bustamante, W., Alpuche-García, Ó., & García-Matías, F. (2014). Participación y apropiación de la modernización y tecnificación del riego en Chihuahua México. *Participation and appropriation of modernization and technified irrigation in Chihuahua Mexico*, XXXV(1), 47–61.
- Omar, O. (2015). Determinación de la disponibilidad de Acuíferos. In *Jornada sobre disponibilidad de Acuíferos*. Chihuahua.
- ONU. (2011). Agricultura, sequía, desertificación, tierra y desarrollo rural. In *Sustainable Development Knowledge Platform*. Retrieved from <http://www.un.org/esa/agenda21/natinfo/countr/mexico/agriculture.pdf>
- Ortega-gaucin, D. (2012). REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA DE PRESAS DEL DISTRITO DE, 4(1), 31–39. <http://doi.org/10.5154/r.inagbi.2011.12.11015>
- Ortega-gaucin, D., Sáenz, E. M., & Vélez, E. P. (2008). ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA EN EL DISTRITO DE RIEGO 005 DELICIAS , CHIHUAHUA, 1–15.
- Ortega-gaucin, D., Sáenz, E. M., Vélez, E. P., Rendón, L., & Exebio, A. (2008). Modelo de Optimización de Recursos para un Distrito de Riego. *Terra Latinoamericana*, 27, 219–226.
- Paegelow, M. (2018). Multi Criteria Evaluation. In M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas, & F. Escobar (Eds.), *Geomatic Approaches for modeling Land Change Scenarios. A review and Comparison of Modeling Techniques* (p. 525). Springer, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.
- Paegelow, M., & Olmedo, M. T. C. (2005). Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*, 19(6), 697–722. <http://doi.org/10.1080/13658810500076443>
- Parga, F., León, A., Vargas, X., & Fuster, R. (2006). El índice de pobreza hídrica aplicado a la cuenca del río Limarí en Chile semiárido, 93–109. Retrieved from [https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/publicaciones/cyted\\_libro\\_XII/articulos/093.pdf](https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/publicaciones/cyted_libro_XII/articulos/093.pdf)
- Parr Rosson, C., Hobbs, A., & Adcocks, F. (2003). The U.S./Mexico Water Dispute: Impacts of Increased Irrigation in Chihuahua, Mexico. In *Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, Mobile, Alabama, February 1-5, 2003. 1* (pp. 1–21).
- Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Van der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007).

*Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

- Paz Sanchez, F. (2012). La administración de los distritos de riego. In *XVII Congreso Internacional de Contaduría Administrativa e Informática*. Retrieved from <http://congreso.investiga.fca.unam.mx/docs/xvii/docs/I12.pdf>
- Pecheux, M. (1981). L'Étrange miroir de l'analyse de discours. *Langages*, 15, 5–8.
- Peña, S., & Fuentes, C. M. (2007). Land Use Changes in Ciudad Juárez , Chihuahua : A Systems Dynamic Model, 8, 65–89.
- Pineda Chacon, G. (2015). *Impacto de la calidad del agua de riego y suelo en cultivos de la region agricola centro-cur del estados de Chihuahua.*
- Pineda, G. (2016a). *Transferencia del arsénico en cultivares de la zona agricola centro-sur del estado de Chihuahua.*
- Pineda, G. (2016b). *TRANSFERENCIA DEL ARSÉNICO EN CULTIVARES DE LA ZONA AGRÍCOLA CENTRO-SUR DEL ESTADO DE CHIHUAHUA.*
- Plate, E. (2002). Environment and humand security. In E. Plate (Ed.), *Contributions to a workshop in Bonn*. Bonn.
- Prévil, C., Thériault, M., & Rouffignat, J. (2003). Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel? *Cahiers de Géographie Du Québec*, 47(130). <http://doi.org/10.7202/007968ar>
- Produce, F. (2012). *Agenda de Innovacion Tecnologica para el Estado de Chihuahua.*
- Prud'homme, J., & Gingras, Y. (2015). Les collaborations interdisciplinaires: Raisons et obstacles. *Actes de La Recherche En Sciences Sociales*, 210(6), 40–49. <http://doi.org/10.3917/arss.210.0040>
- Quintana S., V. M. (2009). *Paysans et citoyens au Mexique: Stratégies paysannes de résistance à la mondialisation à l'ouest de l'état de Chihuahua.* Université de la Sorbonne Nouvelle, Paris III. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00947792>
- Raffestin. (2013). Por una geografia del poder.
- Reghezza, M. (2006). La vulnérabilité: un concept problématique. In F. Leone & F. Vinet (Eds.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles* (Géorisque).
- Reinert, M. (1999). Quelques interrogations á propos de l'objet" d'une analyse de discours de type statistique et de la réponse "Alceste." *Langage & Société*, 58–70.
- Rentería Flores, G., & Pérez Arredondo, F. J. (2010). Cálculo de un índice de pobreza de agua a nivel de

- estados. In *Verano de la Ciencia* (pp. 1–9). Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992013000400003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000400003)
- Revenga, C. (2005). Developing indicators of ecosystem condition using geographic information systems and remote sensing. *Regional Environmental Change*, 5, 205–214.
- Reyes-gómez, V. M. (2006). Caractérisation, à diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'État de Chihuahua (Mexique), *17*(4), 467–474.
- Reyes-Gómez, V. M., López, D. N., Robles, C. A. M., Pineda, J. A. R., Gadsden, H., Ortiz, M. L., & Garza, O. R. H. de la. (2006). Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin-versant du Río Conchos (état de Chihuahua, Mexique). *Science et Changements Planétaires / Sécheresse*, *17*(4), 475–484. <http://doi.org/10.1684/sec.2006.0059>
- Reyes Vazquez, N. del C., & Urrea Lopez, R. (2016). *Retos y oportunidades para el aprovechamiento de la Nuez pecanera en México*. (Centro de Investigacion y Asistencia en Tecnologia y Diseno del Estado de Jalisco A.C., Ed.). Guadalajara, Jalisco, México.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., ... Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, *51*(7), 5217–5237. <http://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Rico, P., & Guimelli, C. (2011). Entre Représentations Sociales et Intentions de Pratiques : l'Implication.
- Rijsberman, F., Manning, N., & Silva, S. (2006). *Aumentar la productividad del agua verde y azul, para equilibrar el agua para alimentacion y medio ambiente* (Documento base del eje tematico agua, alimentacion y medio ambiente). *IV Foro Mundial del Agua*.
- Rivera, M. (2016). Hacer florecer al desierto : Análisis sobre la intensidad de uso de los recursos hídricos subterráneos y superficiales en Chihuahua , México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, *13*(77), 35–61. <http://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr13-77.hfda>
- Roch, L., & Gendron, C. (2005). Le commerce de l'eau virtuelle : du concept à la politique. *Géocarrefour*, *28*/4, 273–284.
- Rousseau, S. (2003). Capabilités, risques et vulnérabilité. In J. . Dubois, J. . Lachaud, J. . Montaud, & A. Pouille (Eds.), *Pauvreté et développement socialement durable* (pp. 11–22). Bordeaux: Press Universitaire de Bordeaux.
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE METHOS. *Theory and Decision*, *31*(1), 49–73.

- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modeling*, 9(3), 161–176.
- SAGARPA. (2005). *Informe de Evaluacion Nacional. Programa de Adecuacion de Derechos de Uso del Agua y Redimensionamiento de Distritos de Riego. PADUA 2004.*
- SAGARPA. (2007). Programa de Adecuacion de Derechos de Uso del Agua y Redimensionamiento de Distritos de Riego (PADUA) 2003-2006.
- SAGARPA. (2012). Principales características económica del sector agrícola, ganadero y forestal. Mexico. Retrieved from <http://sc.inegi.org.mx/cobdem/>
- Sainz, J., & Becerra, M. (2003). Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica*, 1–9. Retrieved from [http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/conf\\_agua\\_mex.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/conf_agua_mex.pdf)
- Sayhi, S.-F. (2012). Traduire dans le domaine de l'économie écologique : les difficultés terminologiques. *Traduire*, 227, 35–36.
- Schmidt, R. H., & Marston, R. A. (1981). Los medanos de Samalayuca, Chihuahua, Mexico. *Journal of Science*, 21(2), 2–6.
- Sébastien, L. (2006). *Humains et non-humains en pourparlers : l'Acteur en 4 Dimensions*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint- Etienne; Université Jean Monnet de Saint Etienne.
- Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., De Silva, R., & Barker, R. (1998). World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues. *IWMI Research Report 19*.
- Secretaria de Desarrollo Rural. (2017). *Programa sectorial. Secretaria de Desarrollo Rural. 2017-2021. Folleto Anexo. Chihuahua.* Retrieved from [http://sds.chihuahua.gob.mx/desarrollosocial/images/planeacion/plan-estatal/PROGRAMA SECTORIAL 2017-2021.pdf](http://sds.chihuahua.gob.mx/desarrollosocial/images/planeacion/plan-estatal/PROGRAMA_SECTORIAL_2017-2021.pdf)
- Secretaria de Economía. (2016). Panorama Minero del Estado de Chihuahua.
- SEMARNAT-CONAGUA. (2015a). *Atlas del Agua en México*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- SEMARNAT-CONAGUA. (2015b). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año agrícola 2013-2014.*
- SEMARNAT. (2004). Degradación del suelo de la República - Escala 1:250000. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección Geomática. México, DF.
- SEMARNAT. (2011). *Tratado sobre aguas internacionales entre México y Estados Unidos: Definición y clasificación de sequía.*

- Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 25(1), 11–32.
- Shirley, W. L., Boruff, B. J., & Cutter, S. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. Retrieved from <http://gcal.summon.serialssolutions.com/search?s.q=Social+Vulnerability+to+environmental+hazards>
- Sisto, N. P. (2010). Manejo sustentable del uso de agua y crecimiento urbano. *Ensayos*, XXIX(1), 23–38.
- Soulé, B. (2007). Observation participante ou participation observante? Usages et justifications de la notion de participation observante en sciences sociales. *Recherches Qualitatives*, Vol. 27(1)(1), 127–140.
- Sturma, A. (2013). *Les défis de l'aïssinissement à Mayotte: Dynamiques de changement social et effets pervers de l'action publique*. UT2 Le Mirail.
- Sullivan, C. (2000). Using the Water Poverty Index to monitor progress in the water sector. *Water Policy & Management*, 4. Retrieved from [http://www.managingforimpact.org/sites/default/files/resource/water\\_poverty\\_index.pdf](http://www.managingforimpact.org/sites/default/files/resource/water_poverty_index.pdf)
- Sullivan, C. (2002). Calculating a Water Poverty Index. *World Development*, 30(7), 1195–1210. [http://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](http://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)
- Sullivan, C., & Jemmali, H. (2014). *Toward understanding water conflicts in Mena region: a comparative analysis using water poverty index*.
- Sullivan, C., & Meigh, J. (2005). Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach: The example of the climate vulnerability index. *Water Science and Technology*, 51(5), 69–78.
- Sullivan, C., Meigh, J. ., & Fediw, T. . (2002). Derivation and Testing of the Water Poverty Index Phase 1. Final Report May 2002. *Center for Ecology and Hydrology CEH. Natural Environmental Research Council*, 1, 1–43. Retrieved from <http://www.soas.ac.uk/water/publications/papers/file38386.pdf>
- Sullivan, C., Meigh, J., & Lawrence, P. (2006). Application of the Water Poverty Index at Different Scales: A Cautionary Tale. *Water International*, 31(3), 412–426. <http://doi.org/10.1080/02508060608691942>
- Sullivan, C., Meigh, J. R., Giacomello, a M., Fediw, T., Lawrence, P., Samad, M., ... Steyl, I. (2003). The water poverty index: Development and application at the community scale. *Natural Resources*

*Forum*, 27, 189–199. <http://doi.org/10.1111/1477-8947.00054>

- Theys, J. (2003). La gouvernance, entre innovation et impuissance, le cas de l'environnement. *Développement Durable Et Territoires*. Retrieved from <http://developpementdurable.revues.org/1523>
- Theys, J. (2005). Les inégalités écologiques, dimensions oubliée de l'action publique: entre raisons politiques et explications épistémologiques. In *Colloque "inégalités sociales et environnementales", 19 mai 2005* (p. 11). Paris: Institut d'Urbanisme de Paris.
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. a, McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Pnas*, 100(14), 8074–8079. <http://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- UN-WWAP. (2009). *Water, a shared responsibility. The United Nations World Water Development Report 2*. <http://doi.org/10.7748/nm.21.4.12.s12>
- UN-WWAP. (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. <http://doi.org/978-92-3-100071-3>
- UN. (2010). *Informe sobre Desarrollo Humano 2010 La verdadera riqueza de las naciones : Caminos al desarrollo humano*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- UN. (2011). *The Millennium Development Goals Report 2011*. New York.
- UNESCO-IHP, IGRAC, & WWAP. (2012). GEF Transboundary Waters Assessment Programme (TWAP) Methodology and Execution Arrangements: Transboundary Aquifers and SIDS Groundwater Systems, 2012(August).
- United Nations. (1992). Agenda 21: Program of Action for Sustainable Development. In *United Nations Conference on Environment and Development, 3-4 june*. Rio de Janeiro, Brazil.
- United Nations. (1998). Commission on Sustainable Development. Report on the Sixth Session, (9), 1–94. Retrieved from [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=E/CN.17/1998/20&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=E/CN.17/1998/20&Lang=E)
- United Nations. (2008). Agriculture, Rural Development, Drought, Desertification, and Land Issues affecting Sustainable Development in the UNECE Region: Achievements, Trends and Challenges, 1–21. <http://doi.org/EB.AIR/WG.5/2001/7>
- United Nations. (2017). Progress towards the Sustainable Development Goals. *Report of the Secretary-General, E/2017/66*(May), 19. <http://doi.org/10.1017/S0020818300006640>
- UNSG. (2016). Progress towards the Sustainable Development Goals. *United Nations Economic and Social Council*, (July), 28. <http://doi.org/10.1017/S0020818300011322>



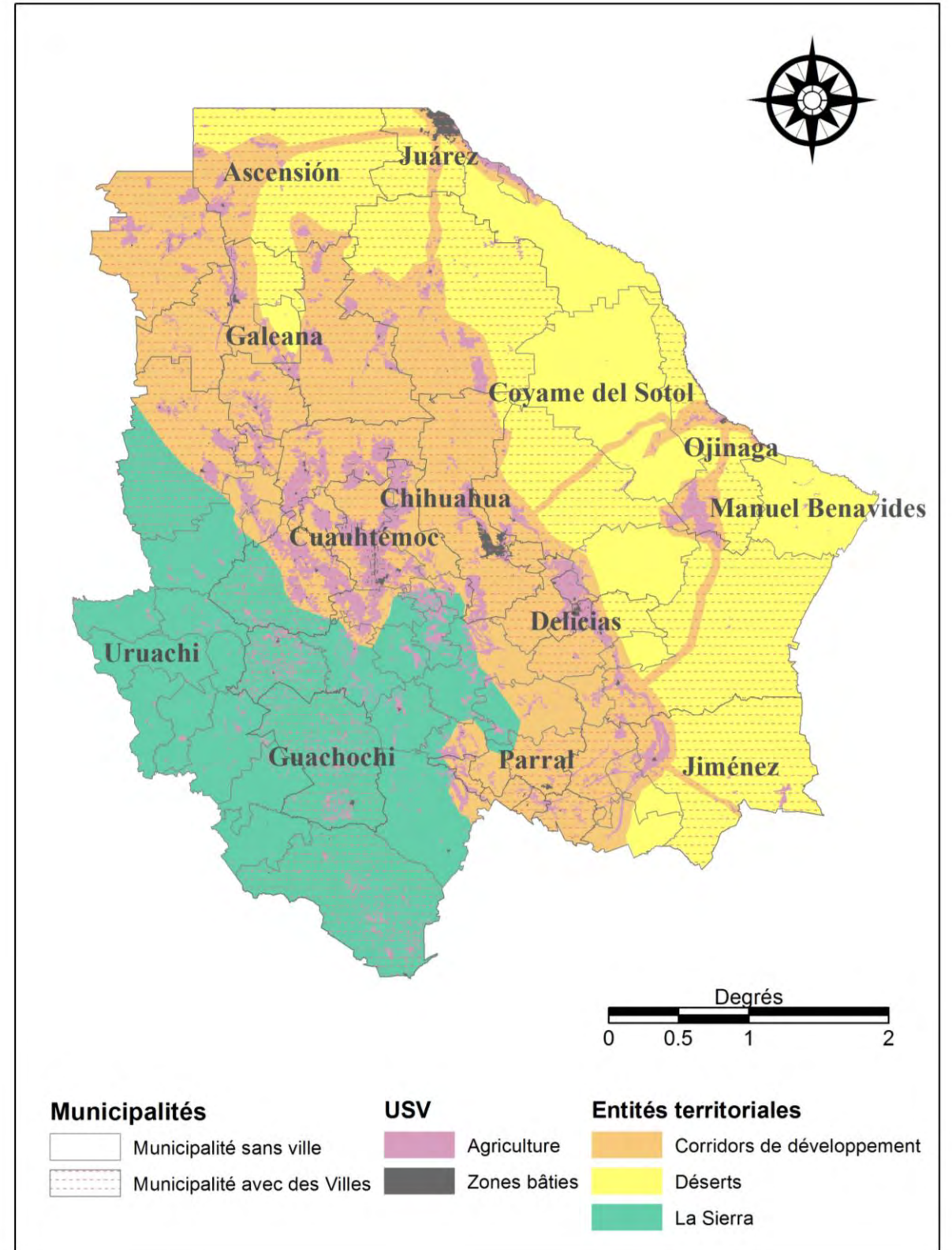
- Urquiza Gómez, A., & Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire Des Amériques*, 218(2015), online.
- Van Campenhoudt, L., & Quivy, R. (2011). *Manuel de recherche en sciences sociales* (Dunod). Paris.
- Van Den Bergh, J. C. J. M. (2009). The GDP paradox. *Journal of Economic Psychology*, 30, 117–135. <http://doi.org/10.1016/j.joep.2008.12.001>
- Van Der Vyver, C. (2012). Effects of Imprecise Weighting on the Water Poverty Index. In J. Steyn & M. Kirlidog (Eds.), *Alleviating Digital Poverty with ITC innovation in emerging economies. Will ICT Rights make a difference?* (pp. 239–248). Istanbul, Turkey: IDIA, Beykent University. Retrieved from <http://www.developmentinformatics.org/conferences/2012/proceedings/IDIA2012-vandervyver-c.pdf>
- Van Der Vyver, C. (2013a). A Comparison of the Traditional and Simplified Methods for Water Poverty Index Calculation. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 4(6), 229–237. <http://doi.org/10.5901/mjss.2013.v4n6p229>
- Van Der Vyver, C. (2013b). Water Poverty Index Calculation: Additive or Multiplicative Function? *Communications of IBIMA*, 2013, 19. <http://doi.org/10.5171/2013>.
- Van Der Vyver, C. (2015). The Capacity Component of the Water Poverty Index and the Impact of Ten Years, 2015. <http://doi.org/10.5171/2015>.
- Van Der Vyver, C., & Jordaan, D. (2011). Water Poverty Mapping and its Role in Assisting Water Management. *Communications of the IBIMA*, 2011(1997), 1–13. <http://doi.org/10.5171/2011.941217>
- Velázquez, E. (2010). Agua Virtual, Huella Hídrica Y El Binomio Agua-Energía: Repensando Los Conceptos. ... De: <Http://Archivo.Ecodes.Org/Pages/> ..., 12. Retrieved from [http://hispagua2.adasistemas.com/sites/default/files/hispagua\\_documento/agua\\_virtual.pdf](http://hispagua2.adasistemas.com/sites/default/files/hispagua_documento/agua_virtual.pdf)
- Villalvazo, P., Corona, J. P., & García, S. (2002). Urbano-rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. *Revista de Información y Análisis*, 20(33), 17–24. <http://doi.org/www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/articulos/sociodemograficas/urbano03.pdf>
- Viqueira Palerm, J. (2006). Distritos de Riego en México , algunos mitos. *Boletín Del Archivo Histórico Del Agua*, 50–70.
- Vollmer, D., Regan, H. M., & Andelman, S. J. (2016). Assessing the sustainability of freshwater

- systems: A critical review of composite indicators. *Ambio*, 45(7), 765–780. <http://doi.org/10.1007/s13280-016-0792-7>
- Vörösmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., & Revenga, C. (2005). Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: An Application to Africa. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 34(3), 230–236. <http://doi.org/10.1579/0044-7447-34.3.230>
- Vörösmarty, C. J., Green, P. A., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 248–288.
- Wegner, G., & Pascual, U. (2011). Cost-benefit analysis in the context of ecosystem services for human well-being: A multidisciplinary critique. *Global Environmental Change*, 21(2), 492–504. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.12.008>
- WHO/UNICEF. (2017). *Progrès en Matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène*.
- Wilder, M., Garfin, G., Ganster, P., H. Eakin, P., Romero-Lankao, Lara-Valencia, F., ... Muñoz-Arriola, F. (2013). Climate Change and U.S.-Mexico Border Communities. *Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment*, 340–384.
- Wilk, J., & Jonsson, A. (2013). *From Water Poverty to Water Prosperity — A More Participatory Approach to Studying Local Water Resources Management water resources management*. <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0209-8>
- William, C. (2016). *Une modélisation multi-agents des dynamiques de front pionnier et de pollution pétrolière en Amazonie*. Université de Toulouse.
- Winpenney, J. (1997). Sustainable management of water resources: an economic view. In R. . Auty & K. Brown (Eds.), *Approches to sustainable development*. London & Washington.
- Yager, R. R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8(1), 183–190.
- Yager, R. R. (1995). An Approach to Ordinal Decision Making. *International Journal of Approximate Reasoning*, 12(Elsevier), 237–261. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/d1a2/4597b89d20501a6d45384ada20a47eb7c6f5.pdf>
- Yager, R. R., & Xu, Z. (2006). The continuous ordered weighted geometric operator and its application to decision making, 157, 1393–1402. <http://doi.org/10.1016/j.fss.2005.12.001>
- Zarafshani, K., & Saadvandi, M. (2017). Determining Agricultural Water Poverty Index in Kermanshah Province: The Case of Mahidasht Basin, Iran, 19, 541–552.



**Annexes**

Annexe 1 : Carte de Chihuahua



## Liste des Tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1 : Différentes définitions de la vulnérabilité.....  | 94  |
| Tableau 2 : Synthèse épistémologique de l'IPE, élaborée à partir de Sullivan et al. (2002).....   | 111 |
| Tableau 3 : Echelles et pays des applications de l'IPE.....   | 120 |
| Tableau 4 : Différentes définitions des composantes de l'IPE à travers la littérature.....  | 134 |
| Tableau 5 : Principales données de qualité de l'eau et de préservation environnementale employées dans la littérature spécialisée sur l'IPE.....              | 141 |
| Tableau 6 : Répartition des « capitaux » au sein des composantes révisées de l'IPE.....   | 155 |
| Tableau 7 : Les stratégies de la méthode OWA, exemple de compensation pour cinq facteurs.....   | 163 |
| Tableau 8 : Indicateurs de la composante de capacité (IDH).....   | 213 |
| Tableau 9 : Indicateurs de la composante d'accès.....   | 214 |
| Tableau 10 : Classification des différents accès à l'irrigation.....  | 217 |
| Tableau 11 : Indicateurs de la composante d'usage.....  | 218 |
| Tableau 12 : Indicateurs de la composante de ressource.....   | 220 |
| Tableau 13 : Regroupements opérés sur les ensembles climatiques de Garcia (1998), en fonction des quantités et de la variabilité de l'eau météorologique..... | 223 |
| Tableau 14 : Indicateurs de préservation environnementale, inclus dans la composante d'environnement.....   | 227 |
| Tableau 15 : Typologie employée pour élaborer l'indicateur d'érosion (M1).....  | 228 |
| Tableau 16 : Analyse des changements d'USV employée pour construire M2 (CONABIO, 2012).....   | 229 |
| Tableau 17 : Indicateurs de qualité de la ressource.....  | 232 |
| Tableau 18 : Construction de l'indicateur de qualité chimique de l'eau (Q1) à l'échelle municipale.....   | 233 |
| Tableau 19 : Construction de l'indicateur de <i>Water stress</i> , associé aux contaminations agricoles.....  | 234 |
| Tableau 20 : Seuils des indicateurs élaborés comme des catégories ou des pourcentages.....  | 237 |
| Tableau 21 : Seuils employés pour les indicateurs conformes aux données internationales.....  | 240 |
| Tableau 22 : Seuils employés pour les indicateurs singuliers.....   | 245 |
| Tableau 23 : La pondération des poids d'ordre employée pour la stratégie 2 d'agrégation OWA.....  | 256 |
| Tableau 24 : Échantillonnage des discours.....  | 266 |
| Tableau 25: Lignes directrices et termes employés pour la tenue des entretiens compréhensifs.....   | 270 |
| Tableau 26 : Indicateurs de l'IPE construits à partir bases de données publiques mexicaines.....  | 278 |
| Tableau 27: Subventions de la CONAGUA (2014).....   | 384 |
| Tableau 28 : Synthèse AFFOM relative aux vulnérabilités associées aux pénuries en eau.....  | 406 |

## Liste des Figures

|   |     |
|---|-----|
| Figure 1 : Approche MOVE des vulnérabilités et de la gestion des risques.....   | 96  |
| Figure 2 : Représentation étendue de l'IPE (résultats aléatoires).....  | 118 |
| Figure 3 : Comment le développement impacte les composantes de l'IPE et les capitaux qui déterminent la pauvreté en eau, adapté de (Sullivan et al., 2002 ; Sullivan et Meigh, 2005)..... | 131 |
| Figure 4 : Les étapes d'AMC opérée avec le logiciel TerrSet, exemple d'EMC pour une composante intégrant trois indicateurs.....   | 156 |
| Figure 5 : Les quatre fonctions d'aptitude définies dans l'analyse « FUZZY » (Eastman, 2016) .....  | 157 |
| Figure 6 : Application EMC proposée dans le logiciel TerrSet .....  | 160 |
| Figure 7: Composantes (bleues) et outils (oranges) d'analyse de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau.....  | 174 |
| Figure 8 : Intersection sous ArcGis,.....   | 252 |
| Figure 9 : Système d'acteurs de la gestion de l'eau à Chihuahua.....  | 261 |
| Figure 10: Schéma actantiel, élaboré à partir de Van Campenhoudt et Quivy (2011).....   | 275 |

## Liste des Cartes

|   |     |
|---|-----|
| Carte 1 : Chihuahua, un état aride du nord du Mexique, adapté de (CONABIO, 2012).....   | 80  |
| Carte 2 : Résultats de l'IPE calculé au Mexique par Rentería Flores et Pérez Arredondo (2010) .....                             | 80  |
| Carte 3: Les fleuves de Chihuahua appartenant au bassin du Rio Bravo (CONABIO, 2012) .....                                      | 178 |
| Carte 4: Usage des sols et de la végétation à Chihuahua de 2012 (adapté de CONABIO, 2012).....                                  | 181 |
| Carte 5 : Délimitation des trois ensembles géographiques de l'Etat de Chihuahua, (adapté de CONABIO, 2012).....                 | 184 |
| Carte 6: La sous-région de Delicias.....  | 187 |
| Carte 7 : Ecoulements superficiels, adapté de (CONABIO, 2012).....  | 221 |
| Carte 8 : Carte de dégradation des sols, adapté de (CONABIO, 2012).....   | 228 |
| Carte 9 : Représentation des ensembles démographiques considérés pour .....   | 252 |
| Carte 10 : Représentation des surfaces agricoles considérées pour spatialiser l'IPE à Chihuahua, adapté de CONABIO (2012) ..... | 254 |
| Carte 11 : Indicateur de revenu, C1 .....   | 285 |
| Carte 12 : Indicateur de revenu normalisé, C1 .....   | 285 |
| Carte 13 : Indicateur d'éducation, C3 .....   | 287 |
| Carte 14 : Indicateur d'éducation normalisé, C3 .....   | 287 |

|  |     |
|--|-----|
| Carte 15 : Indicateur de cohésion sociale, C1b.....                                | 289 |
| Carte 16 : Indicateur de cohésion sociale normalisé, C1b .....                     | 289 |
| Carte 17 : Indicateur de mortalité infantile, C2 .....                             | 291 |
| Carte 18 : Indicateur de mortalité infantile normalisé, C2.....                    | 291 |
| Carte 19 : Indicateur d'accès à l'eau, A2 .....                                    | 293 |
| Carte 20 : Indicateur d'accès à l'eau normalisé, A2 .....                          | 293 |
| Carte 21 : Indicateur d'accès à l'assainissement, A3 .....                         | 295 |
| Carte 22 : Indicateur d'accès à l'assainissement normalisé, A3 .....               | 295 |
| Carte 23 : Indicateur d'accès à l'irrigation, A1 .....                             | 297 |
| Carte 24 : Indicateur d'accès à l'irrigation normalisé, A1 .....                   | 297 |
| Carte 25 : Indicateur d'usage public, U1 .....                                     | 299 |
| Carte 26 : Indicateur d'usage public normalisé, U1 .....                           | 299 |
| Carte 27 : Indicateur d'usage agricole, U2 .....                                   | 301 |
| Carte 28 : Indicateur d'usage agricole normalisé, U2.....                          | 301 |
| Carte 29 : Indicateur d'usage industriel, U3 .....                                 | 303 |
| Carte 30 : Indicateur d'usage industriel normalisé, U3 .....                       | 303 |
| Carte 31 : Indicateur d'écoulement superficiel, R1 .....                           | 305 |
| Carte 32 : Indicateur d'écoulement superficiel normalisé, R1 .....                 | 305 |
| Carte 33 : Indicateur d'eau souterraine, R3 .....                                  | 306 |
| Carte 34 : Indicateur d'eau souterraine normalisé, R3 .....                        | 306 |
| Carte 35 : Indicateur d'eau météorologique, R2.....                                | 308 |
| Carte 36 : Indicateur d'eau météorologique normalisé, R2 .....                     | 308 |
| Carte 37 : Indicateur d'érosion des sols, M1 .....                                 | 311 |
| Carte 38 : Indicateur d'érosion des sols normalisé, M1.....                        | 311 |
| Carte 39 : Indicateur de dégradation de la couverture arborée, M2.....             | 313 |
| Carte 40 : Indicateur de dégradation de la couverture arborée normalisé, M2.....   | 313 |
| Carte 41 : Indicateur de surexploitation des aquifères, M3 .....                   | 315 |
| Carte 42 : Indicateur de surexploitation des aquifères normalisés, M3 .....        | 315 |
| Carte 43 : Indicateur de qualité chimique de l'eau, Q1 .....                       | 317 |
| Carte 44 : Indicateur de qualité chimique de l'eau normalisé, Q1.....              | 317 |
| Carte 45 : Indicateur de contamination agricole de la ressource, Q2 .....          | 319 |
| Carte 46 : Indicateur de contamination agricole de la ressource normalisé, Q2..... | 319 |
| Carte 47 : Indicateur de traitement de l'eau résiduelle, Q3 .....                  | 321 |



|   |     |
|---|-----|
| Carte 48 : Indicateur de traitement de l'eau résiduelle normalisé, Q3.....                  | 321 |
| Carte 49 : Composante de capacité.....  | 330 |
| Carte 50 : Composante d'Accès.....  | 331 |
| Carte 51 : Composante d'accès.....  | 332 |
| Carte 52 : Composante d'usage .....   | 333 |
| Carte 53 : Composante de ressource.....   | 335 |
| Carte 54 : Composante d'environnement .....   | 336 |
| Carte 55 : IPE-SIG obtenu avec des indicateurs socio-économiques l'échelle municipale ..... | 339 |
| Carte 56 : Résultats obtenus en soustrayant l'IPE à l'IDH.....                              | 341 |
| Carte 57 : SIG-IPE municipal à Ahumada et Coyame del Sotol .....                            | 344 |
| Carte 58 : SIG-IPE municipal dans les régions agricoles d'Ojinaga, Delicias et Jiménez..... | 346 |
| Carte 59: SIG-IPE municipal dans la région agricole de Cuauhtémoc.....                      | 348 |
| Carte 60 : Résultats de l'IPE-SIG spatialisé .....  | 358 |
| Carte 61 : Soustraction de l'IPE-SIG spatialisé à l'IPE-SIG municipal.....                  | 362 |
| Carte 62 : IPE-OWA .....  | 366 |
| Carte 63 : IPE-SIG spatialisé dans la sous-région de Delicias .....                         | 400 |

### Liste des Photos

|  |     |
|--|-----|
| Photo 1 : Barrage la Boquilla, dit <i>las Virgenes</i> (Auteure, 2014).....  | 377 |
| Photo 2 : Le Río Conchos alimentant des champs travaillés au tracteur dans la municipalité de Julimes .....  | 379 |
| Photo 3 : Un <i>canalero</i> indique le système de vanne qu'il opère pour le Module 8 (Auteure, 2016)  | 381 |
| Photo 4 : « L'eau que tu jettes aujourd'hui sur ta parcelle, tu en auras besoin demain pour tes semences. ....   | 382 |
| Photos 5, 5' et 5" : Différentes techniques d'irrigation employés dans la zone d'étude (Auteure, 2016).....  | 389 |
| Photo 6 : Diapositive de présentation du Plan Directeur élaboré par CONAGUA à la demande d'une SRL formée par des producteurs d'UR (Auteure, 2015) ..... | 392 |
| Photo 7 : L'eau extraite à faible profondeur coule presque sans interruption et avive les doutes des producteurs (Auteure, 2017) .....                   | 394 |
| Photo 8 : « Liste des producteurs bénéficiant de la relocalisation du puit officiel n°87 ».....  | 395 |
| Photo 9 : Local d'une JR de la zone d'étude (Auteure, 2015).....   | 397 |

Photo 10 : Conférence plénière de lancement de l'expo/agro et forum de l'eau à Chihuahua en 2016  
(Auteur).....**Erreur ! Signet non défini.**

## Table de matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une approche interdisciplinaire : application cartographique de l'IPe et étude de discours dans l'Etat de Chihuahua (Mexique)</b> ..... | <b>1</b>  |
| <b>Résumé</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>Resumen</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>Liste des Sigles</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>Resumen extenso en español:</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>LISTA DE MAPAS</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>LISTA DE ILUSTRACIONES</b> .....  | <b>4</b>  |
| .....  |           |
| ..... <b>Introducción</b>  |           |
| .....  | <b>5</b>  |
| <b>1.1 MARCO TEÓRICO</b> .....   | <b>7</b>  |
| 1.1.1 <i>Monitorear la escasez en agua</i> .....   | <b>7</b>  |
| 1.1.2 <i>Estudiar la vulnerabilidad de manera operativa</i> .....  | <b>8</b>  |
| 1.1.3 <i>Elaborar diagnósticos de vulnerabilidad asociados a la escasez del agua</i> .....   | <b>10</b> |
| <b>1.2 ANTECEDENTES</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.2.1 <i>Cálculo del IPA</i> .....   | <b>12</b> |
| 1.2.2 <i>Límites del IPA</i> .....   | <b>14</b> |
| 1.2.3 <i>Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multi-Criterios (EMC)</i> .....   | <b>16</b> |
| 1.2.4 <i>Análisis de la vulnerabilidad social</i> .....  | <b>19</b> |
| <b>1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....   | <b>21</b> |
| 1.3.1 <i>Hipótesis</i> .....   | <b>21</b> |
| 1.3.2 <i>Objetivo general</i> .....  | <b>21</b> |
| 1.3.3 <i>Objetivos particulares</i> .....  | <b>21</b> |
| <b>1.4 ZONAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....  | <b>22</b> |
| 1.4.1 <i>El estado de Chihuahua</i> .....  | <b>22</b> |
| 1.4.2 <i>La subregión de Delicias</i> .....  | <b>24</b> |
| .....  |           |
| ..... <b>Materiales y Metodología</b>  |           |
| .....  | <b>29</b> |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 2.1  | DATOS DISPONIBLES Y SELECCIÓN DE LOS INDICADORES DEL IPA .....  | 29        |
| 2.2  | ESTANDARIZACIÓN DE LOS INDICADORES MEDIANTE LA OPERACIÓN “FUZZY” DEL MÉTODO EMC .....   | 32        |
| 2.3  | PONDERACIÓN E INTEGRACIÓN DEL IPA MEDIANTE LAS FASES DE CÁLCULO DEL EMC.....  | 36        |
| 2.4  | ANÁLISIS CUALITATIVOS .....   | 38        |
| 2.5  | POBLACIÓN DE ESTUDIO Y COLECTA DE DISCURSOS.....  | 39        |
| 2.6  | ANÁLISIS DE LOS DISCURSOS.....  | 43        |
| ..... <b>Resultados</b>  |   |           |
| .....  |   | <b>46</b> |
| 3.1  | RESULTADOS DEL IPA-POR-MUNICIPIO (ESCENARIO 1) .....  | 46        |
| 3.2  | RESULTADOS DEL IPA-LOCAL (ESCENARIO 2) .....  | 47        |
| 3.3  | RESULTADOS DEL IPA-OWA (ESCENARIO 3) .....  | 48        |
| 3.4  | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SOCIAL EN LA REGIÓN DE DELICIAS.....  | 50        |
| 3.5  | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN LA REGIÓN DE DELICIAS, INCLUYENDO EL IPA Y EL ANÁLISIS AFFOM .....   | 56        |
| ..... <b>Discusiones</b>   |   |           |
| .....  |   | <b>61</b> |
| 4.1  | DISCUSIÓN DE LOS APORTES DEL IPA-SIG .....  | 61        |
| 4.2  | DISCUSIÓN DE LA MODELIZACIÓN DEL IPA-SIG .....  | 63        |
| 4.3  | DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOCIAL Y DIAGNÓSTICO INTERDISCIPLINARIO DE VULNERABILIDAD ASOCIADA A LA ESCASEZ EN AGUA EN LA SUBREGIÓN DE DELICIAS .....  | 66        |
| ..... <b>Conclusiones</b>  |   |           |
| .....  |   | <b>71</b> |
| <b>Thèse en Français : .....</b>   |   | <b>74</b> |
| <b>Diagnostiquer la vulnérabilité relative aux pénuries en eau par une approche interdisciplinaire : application cartographique de l’IPE et étude de discours dans l’Etat de Chihuahua (Mexique) .....</b> |   | <b>74</b> |
| <b>Introduction générale .....</b>   |   | <b>75</b> |
| ..... <b><u>Partie 1 : Diagnostics des vulnérabilités liées aux pénuries en eau : définitions et outils</u></b>  |   |           |
| .....  |   | <b>82</b> |
| 1.1  | VULNÉRABILITÉS ET PÉNURIES EN EAU : DÉFINITIONS ET APPLICATIONS POUR L’AIDE À LA PRISE DE DÉCISION .....  | 83        |
| 1.1.1  | <i>Pénuries en eau : une problématique multidimensionnelle .....</i>  | 83        |
| 1.1.2  | <i>Définitions et études de vulnérabilité appliquée aux problématiques socio-environnementales : vers quels outils de diagnostics ? .....</i>                       | 92        |
| 1.1.3  | <i>Diagnostiquer la vulnérabilité liée aux pénuries en eau à travers le calcul et la discussion de l’IPE : les ressorts d’une approche interdisciplinaire .....</i> | 101       |
| 1.2  | OPPORTUNITÉS DE L’IPE POUR DIAGNOSTIQUER LES PÉNURIES EN EAU .....  | 108       |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1.2.1 | <i>Qu'est-ce que l'IPE ? Les définitions et fondements d'un outil de diagnostics interdisciplinaire</i> .....   | 109 |
| 1.2.2 | <i>Méthode de calcul de l'IPE : les étapes traditionnelles de l'analyse multicritères (AMC) appliquées à l'IPE</i><br>112   |     |
| 1.2.3 | <i>Applications de l'IPE : un indice aux usages multiples</i> .....   | 118 |
| 1.3   | LIMITES ET ENJEUX ACTUELS DE LA CONSTRUCTION D'UN INDICE TEL QUE L'IPE AUX ÉCHELLES RÉGIONALES ET NATIONALES .....  | 124 |
| 1.3.1 | <i>Quelle représentativité territoriale pour l'IPE ? Quand on aborde la question des simplifications à partir de considérations statistiques et géographiques</i> ..... | 124 |
| 1.3.2 | <i>Limites fondamentales de la composition de l'IPE : des freins pour l'interdisciplinarité et la répliquabilité de l'indice</i>  | 130 |
| 1.3.3 | <i>Débats concernant la construction des composantes : quelles intégrations du développement et des facteurs hydrologiques et environnementaux dans l'IPE ?</i> .....   | 139 |
| 1.4   | CALCULER UN IPE-SIG ET LE COMPLÉTER PAR UNE ANALYSE DE DISCOURS DANS LE CADRE D'UN DIAGNOSTIC DE VULNÉRABILITÉ ....   | 145 |
| 1.4.1 | <i>Adapter l'IPE pour étudier la vulnérabilité associée aux pénuries en eau de manière interdisciplinaire au Mexique</i>  | 146 |
| 1.4.2 | <i>Réaliser un diagnostic de vulnérabilité associée aux pénuries en eau en adoptant des outils SIG pour construire l'IPE</i> .....                                      | 153 |
| 1.4.3 | <i>Compléter l'IPE par une analyse de discours pour diagnostiquer la vulnérabilité de manière interdisciplinaire et sans perdre de vue l'aide à la décision</i> .....   | 164 |
|       | CONCLUSIONS PARTIELLES .....  | 172 |

**Partie 2 : Approches croisées de la vulnérabilité associée aux pénuries en eau dans l'état de Chihuahua : cartographier la pauvreté en eau et analyser les discours d'acteurs .....**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 2.1   | DES DÉGRADATIONS DE LA RESSOURCE À LA PÉNURIE EN EAU : VULNÉRABILITÉ, USAGES ET GESTION DE L'EAU DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA .....                  | 176 |
| 2.1.1 | <i>Dégradations de la ressource et enjeux de gestion dans l'Etat de Chihuahua : quand les espaces arides sont productifs</i> .....               | 176 |
| 2.1.2 | <i>Gestion de l'eau et systèmes d'acteurs dans les municipalités agricoles de Delicias, Julimes, Meoqui et Rosales (Etat de Chihuahua)</i> ..... | 186 |
| 2.2   | DONNÉES DISPONIBLES POUR LA CONSTRUCTION DE L'IPE AU MEXIQUE : LA COLLECTE ENTRE ABONDANCES ET CARENCES.....                                     | 192 |
| 2.2.1 | <i>Bases de données socio-économiques : la profusion redondante des données mises en ligne par l'INEGI et le CONEVAL</i> .....                   | 193 |
| 2.2.2 | <i>Bases de données environnementales : échelles et complémentarité des ressources en ligne de CONABIO et de CONAGUA</i> .....                   | 197 |
| 2.2.3 | <i>Prendre en compte les complémentarités et les limites des données publiques au Mexique pour rationaliser la sélection des données</i> .....   | 205 |
| 2.3   | ANALYSE DES DONNÉES UTILISÉES POUR ÉVALUER LA PAUVRETÉ EN EAU SUR LE TERRITOIRE MEXICAIN : ÉLABORER LES INDICATEURS DE L'IPE                     | 210 |
| 2.3.1 | <i>Indicateurs socio-économiques organisés dans trois composantes</i> .....  | 212 |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 2.3.2  | <i>Indicateurs hydrologiques inclus dans la composante de ressource</i> .....   | 219        |
| 2.3.3  | <i>Sélection des indicateurs de la composante d'environnement</i> .....   | 226        |
| 2.4  | EVALUATION MULTICRITÈRE (ÉTAPE PAR ÉTAPE) ET MODÉLISATION .....   | 236        |
| 2.4.1  | <i>Standardisation des données et analyses « FUZZY »</i> .....  | 236        |
| 2.4.2  | <i>Modéliser l'IPE : comparer différentes unités calculs et différents alternatives d'agrégations</i> .....   | 247        |
| 2.5  | ANALYSER LES DISCOURS D'ACTEURS : LES OPPORTUNITÉS DES MÉTHODES QUALITATIVES POUR PRÉCISER L'ANALYSE DES VULNÉRABILITÉS SOCIALES .....                                    | 257        |
| 2.5.1  | <i>Identifier les systèmes d'acteurs de la gestion de l'eau pour échantillonner la collecte de discours à Delicias (Chihuahua)</i> .....                                  | 257        |
| 2.5.2  | <i>Collecter les discours et identifier les relations qui déterminent les vulnérabilités associées aux pénuries en eau dans la région agricole de Delicias</i> .....      | 268        |
|  | CONCLUSIONS PARTIELLES .....  | 277        |
| <b>Partie 3 : Diagnostics de vulnérabilité dans l'Etat de Chihuahua, résultats et discussions de du calcul de l'IPE-SIG et de l'analyse des discours d'acteurs</b> ..... |   | <b>282</b> |
| o  | CARTES D'INDICATEURS NORMALISÉS GRÂCE AUX OUTILS SIG (CARTES RASTER ET « FUZZY ») .....   | 283        |
| 3.1.1  | <i>Présentation des cartes d'indicateurs socio-économiques standardisés avec la méthode « FUZZY »</i> .....   | 283        |
| 3.1.2  | <i>Présentation des cartes d'indicateurs hydrologiques et environnementaux standardisés avec la technique « FUZZY »</i> .....   | 304        |
| 3.1.3  | <i>Discussions : les indicateurs construits et normalisés pour élaborés l'IPE-SIG</i> .....   | 322        |
| 3.2  | APPLICATION MUNICIPALE DE L'IPE-SIG DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA .....  | 337        |
| 3.2.1  | <i>Interprétation des variations inter-municipales</i> .....  | 338        |
| 3.2.2  | <i>Visibilité des enjeux environnementaux et hydrologiques à travers les variations intra-municipales</i> .....   | 343        |
| 3.2.3  | <i>Discussions : Identifier les enjeux de pauvreté en eau à travers l'IPE-SIG municipal</i> .....   | 349        |
| 3.3  | MODÉLISATION DE L'IPE DANS L'ÉTAT DE CHIHUAHUA : TIRER PARTI DES ALTERNATIVES SIG ET EMC.....   | 356        |
| 3.3.1  | <i>Visibilité des enjeux de gestion dans la modélisation l'IPE dans l'Etat de Chihuahua</i> .....   | 357        |
| 3.3.2  | <i>Discussions : Apports et défis de la modélisation spatialisée de l'IPE</i> .....   | 368        |
| 3.4  | DIAGNOSTICS DE VULNÉRABILITÉ DANS LES MUNICIPALITÉS AGRICOLES DE LA SOUS-RÉGION DE DELICIAS : RÉSULTATS OBTENUS EN COMPLÉTANT L'IPE-SIG PAR UNE ANALYSE DES DISCOURS..... | 376        |
| 3.4.1  | <i>Régulations sociales, fragilités socio-culturelle et institutionnelles face aux pénuries en eau en milieu agricole</i> 376   |            |
| 3.4.2  | <i>Capacités et supports d'adaptation face aux pénuries en eau en contexte semi-aride</i> .....   | 387        |
| 3.4.3  | <i>Synthèses et discussion du diagnostic interdisciplinaire de vulnérabilités associées aux pénuries en eau dans la sous-région de Delicias</i> .....                     | 398        |
|  | CONCLUSIONS PARTIELLES .....  | 404        |
| <b>Conclusions générales</b> .....   |   | <b>408</b> |
| <b>Bibliographie</b> .....   |   | <b>416</b> |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>Annexes</b> .....               | <b>442</b> |
| ANNEXE 1 : CARTE DE CHIHUAHUA..... | 443        |
| <b>Liste des Tableaux</b> .....    | <b>444</b> |
| <b>Liste des Figures</b> .....     | <b>445</b> |
| <b>Liste des Cartes</b> .....      | <b>445</b> |
| <b>Liste des Photos</b> .....      | <b>447</b> |
| <b>Table de matières</b> .....     | <b>449</b> |

